Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Г. К. ЖЕРВЕ

КАК РАССЧИТАТЬ ОБМОТКУ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

ВЫПУСК 26

Г. К. ЖЕРВЕ

КАК РАССЧИТАТЬ ОБМОТКУ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

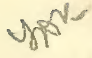
МОСКВА 1960 ЛЕНИНГРАД

ЭЭ-3-3

В брошюре рассматриваются примеры расчета асинхронных двигателей при перемотке.

Приводятся формуляры расчета с пояснениями, как ими пользоваться.

Брошюра предназначена для электриков-практиков, занимающихся эксплуатацией и ремонтом электродвигателей.



ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемое сокращенное руководство по расчету обмотки статора асинхронного двигателя при перемотке предназначено для электриков-практиков, встречающихся с необходимостью проведения относительно несложных расчетов.

Область применения руководства ограничена наиболее распространенными массовыми случаями перемоток; имеются в виду только двигатели мощностью примерно до 100 *квт* с напряжением не выше 500 *в*; перемотки, выходящие за эти пределы, требуют уже более подробного расчета, но они встречаются значительно реже.

Все формулы, приведенные в руководстве, даны без выводов и построены с таким расчетом, чтобы в них можно было подставлять размеры, измеренные в миллиметрах, как это принято на производстве. Исключение сделано здесь только для линейной нагрузки, выраженной в амперах на сантиметр.

Если читатель захочет ознакомиться с расчетом по другим руководствам, он должен иметь в виду, что там все линейные размеры, кроме относящихся к поперечному сечению проводников, выражены в сантиметрах.

Для всех величин приняты обозначения, соответствующие наиболее широко установившимся на практике; индексы при них приняты исключительно русские.

Изложение иллюстрируется примерами, имеющими преемственную связь и составляющими полный расчет обмотки статора и проверку соотношения чисел зубцов статора и ротора при данном числе полюсов.

1. КОГДА И ДЛЯ ЧЕГО НУЖНО ПРОИЗВОДИТЬ РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА?

Если статор асинхронного двигателя по какой-либо причине подвергается перемотке, то во всех случаях, когда в его обмотку вносятся изменения от первоначального

исполнения, хотя бы на первый взгляд и незначительные, их допустимость должна быть проверена расчетом.

Даже в самом простом случае, когда задачей перемотки является восстановление поврежденного двигателя с сохранением его первоначальных данных — напряжения, скорости вращения (числа оборотов в минуту), а следовательно, и мощности, может встретиться необходимость в расчетной проверке.

Так, например, может не оказаться в наличии проводника того диаметра и с той изоляцией, которые были до перемотки.

Если взять проводник меньшего диаметра, то обмотка будет перегреваться больше, чем до перемотки, следовательно, перемотанный двигатель уже не будет способен отдать прежнюю мощность. Если же взять проводник большего диаметра, то может случиться, что прежнее число проводников нельзя поместить в паз; тогда нужно решить, допустимо ли уменьшение числа проводников по сравнению с первоначальным, а ответ даст только расчет.

Немного сложнее случай, когда требуется перемотать двигатель на новое напряжение с сохранением прежней скорости вращения. Однако и в этом случае нельзя ограничиваться только пересчетом числа витков обмотки пропорционально напряжению; диаметр проводника должен быть выбран так, чтобы сразу, не производя проб, получить хорошее заполнение паза — не слишком слабое, чтобы в пазах не оставалось неиспользованного места, и не слишком плотное, чтобы обмотка могла быть вложена в пазы.

При перемотке статора на низшее напряжение в некоторых случаях удается еще немного повысить мощность двигателя, а при перемотке на высшее напряжение следует проверить, не нужно ли несколько ограничить мощность двигателя, чтобы не подвергать его чрезмерному перегреванию.

Тем более необходим расчет при перемотке на новую скорость вращения. Здесь вопрос о напряжении уже не является существенным, так как совершенно безразлично, будет ли оно сохранено прежним или изменено; объем расчета от этого не зависит.

Такой же объем имеет расчет и в том случае, когда прежняя обмотка совершенно отсутствует. Если на двигателе сохранился его заводский щиток, т. е. известны первоначальные данные — мощность, напряжение, ток, скорость вращения, и если требуется восстановить его по этим данным, они могут помочь при расчете. Однако не всегда легко выполнить такую задачу — современные высокоиспользованные электродвигатели являются продуктом очень кропотливого расчета, и даже небольшие отклонения от него приводят к понижению мощности. Будет уже неплохо, если от перемотанного двигателя удастся получить 85—90% первоначальной мощности.

Наиболее труден тот случай, когда на машине не сохранился заводский щиток и поэтому ее данные совершенно неизвестны. В этом случае в задачу расчета входит также приближенное определение мощности, которую сможет развить двигатель, намотанный на заданные напряжение и скорость вращения; более точно эта мощность может быть определена только после испытания перемотанного двигателя на нагревание под нагрузкой.

Настоящее краткое руководство построено именно для такого, наиболее трудного, случая; применить его для более простых случаев не представляет каких-либо затруднений.

Сущность основной части расчета всякой электрической машины состоит в нахождении наилучшего соотношения между магнитными и электрическими нагрузками ее частей. В применении к перемотке статора асинхронного двигателя это сводится к наиболее удачному выбору числа витков в каждой фазе обмотки. Если это число слишком мало, то магнитные нагрузки будут чрезмерно велики, а электрические нагрузки — недостаточны. Если же, наоборот, число витков слишком велико, то магнитные нагрузки окажутся заниженными, но зато электрические — чересчур высокими. И то, и другое плохо. Как же найти нужное равновесие? Его нельзя определить отвлеченно; необходимо воспользоваться опытом постройки огромного количества двигателей, накопленным за долгие годы, и сравнить с ним результаты расчетов, полученных на основании проб. Следует заранее предупредить, что далеко не всегда бывает легко выбрать наилучшее решение; одна проба оказывается лучшей по од-

ним признакам и худшей по другим; другая проба — наоборот.

Верным решением задачи будет то, которое имеет меньше всего отклонений от данных практики, и сами эти отклонения невелики.

2. КАКИЕ ДАННЫЕ НУЖНЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ОБМОТКИ?

Задание для перемотки асинхронного двигателя обычно имеет следующий вид: на данном сердечнике следует выполнить двигатель на такое-то напряжение и на такую-то скорость вращения; желательно, чтобы его мощность была не ниже такой-то. Несколько реже оговаривается еще, при каком соединении фаз (в звезду или в треугольник) должен нормально работать данный двигатель, или же, что он должен быть пригоден для работы при двух напряжениях, находящихся в соотношении 1 : 1,73, например, 220 и 380 *в* или 127 и 220 *в*; тогда при меньшем из этих двух напряжений его фазы должны быть соединены в треугольник, а при большем — в звезду.

Обычно в двигателях мощностью до 100 *квт* приходится встречаться только со следующими четырьмя значениями напряжения: 127, 220, 380 и 500 *в*; первое и последнее из них встречаются значительно реже остальных.

Однако нет препятствий к расчету обмотки и на любое иное значение напряжения, если только не предъявляется требование выполнить двигатель на слишком высокое или на слишком низкое напряжение.

При слишком высоком напряжении (выше 500 *в*) изоляцию пазов нужно будет взять настолько толстой, что внутри пазов не останется достаточно места для обмотки, а близость ее лобовых частей к сердечнику и корпусу машины и друг к другу будет создавать опасность пробоя на корпус или между фазами.

При слишком низком напряжении (порядка нескольких вольт) количество витков в каждой фазе становится таким малым, а сечение проводников таким большим, что создаются затруднения в распределении обмотки по пазам и в выполнении соединений отдельных ее частей между собой.

Скорость вращения, выражаемая числом оборотов в минуту, у асинхронных двигателей не может быть произвольной, как у двигателей постоянного тока. Хотя асинхронные двигатели (кроме самых мелких) и не имеют явно выраженных полюсов, как машины постоянного тока или синхронные машины, но тем не менее их магнитное поле, создаваемое обмоткой статора, имеет вполне определенное число пар полюсов p, зависящее от устройства обмотки. Это магнитное поле не остается неподвижным в пространстве, но вращается с такой скоростью, что за каждый период питающего переменного тока поворачивается на одну пару полюсов (рис. 1).

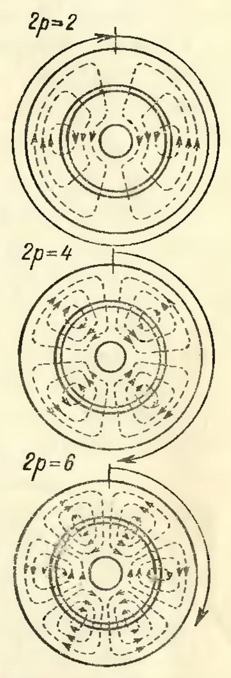


Рис. 1. Вращающиеся поля с различными числами полюсов.

Следовательно, в двигателе, обмотка которого рассчитана на одну пару полюсов, магнитное поле за один период совершит полный оборот, а его скорость вращения будет:

$$n_0 = 60 f \ \text{об/мин},$$

где через f обозначена частота переменного тока в герцах (периодах в секунду). При $f = 50$ *гц* это дает:

$$n_0 = 60 \cdot 50 = 3000 \ \text{об/мин}.$$

Если же обмотка статора создает магнитное поле с p парами полюсов, то скорость вращения будет в p раз меньше:

$$n_0 = \frac{3000}{p} \ [\text{об/мин}].$$

В двигателях мощностью до 100 *квт* встречаются обычно следующие числа пар полюсов: 1, 2, 3 и 4. Соответственно этому скорость вращения магнитного поля может быть 3000, 1500, 1000 и 750 *об/мин.* Более высокие числа пар полюсов (следовательно меньшие скорости вращения) крайне редки.

При холостом ходе двигателя, т. е. при отсутствии нагрузки, скорость вращения его ротора почти равна скорости вращения магнитного поля или, как говорят, сколь-

жение ротора в магнитном поле весьма незначительно. По мере возрастания нагрузки скольжение увеличивается и скорость вращения ротора уменьшается; однако это уменьшение даже при полной нагрузке относительно невелико и составляет у мелких двигателей 5—6 %, у более крупных 1,5—2% и менее.

Таким образом, задаваемая скорость вращения ротора должна быть близка к одному из указанных выше чисел оборотов в минуту, но всегда несколько ниже него.

Поэтому не представляет затруднений сообразить, какому числу пар полюсов она соответствует.

Так, если сказано, что двигатель имеет 960 *об/мин*, то из этого ясно, что обмотка должна иметь три пары полюсов; но нельзя требовать, чтобы двигатель давал, например, 1200 *об/мин,* поскольку такая скорость вращения двигателя далека от соответствующей какому-нибудь числу полюсов.

Для того чтобы иметь возможность произвести расчет обмотки статора по заданию, нужно тщательно очистить сердечник от остатков прежней обмотки и ее изоляции (не прибегая, однако, к помощи пил, хотя бы и с мелкой насечкой), после чего должны быть измерены следующие размеры (рис. 2).

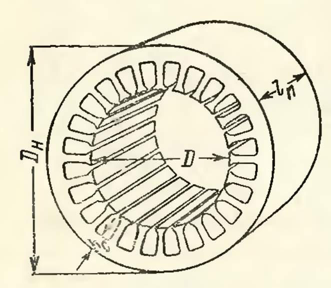


Рис. 2. Основные размеры сердечника статора.

1. Внутренний диаметр сердечника статора (или диаметр расточки) D — внутренним микрометром, штангенциркулем, штихмассом или даже слесарным кронциркулем (или нутромером) с масштабной линейкой.

2. Наружный диаметр сердечника статора $D_н$ (если его вообще возможно измерить) — при помощи одного из перечисленных инструментов в зависимости от условий измерения.

3. Высота тела статора h (если возможно) — при помощи штангенциркуля.

4. Полная длина сердечника статора в осевом направлении $l_п$ — штангенциркулем или мас-

штабной линейкой по дну пазов, но не по зубцам, которые обычно имеют так называемый «веер» (раздаются в стороны).

5. Число пазов (или зубцов). статора Z_1.

6. Размеры пазов статора. В двигателях мощностью до 100 *квт* обычно встречаются пазы одной из следующих четырех форм:

а) овальный паз (рис. 3, *а*);

б) паз с сильно закругленными углами (рис. 3, *б*);

в) паз со слабо закругленными углами (рис. 3, в);

г) паз с незакругленными углами (рис. 3, *г*).

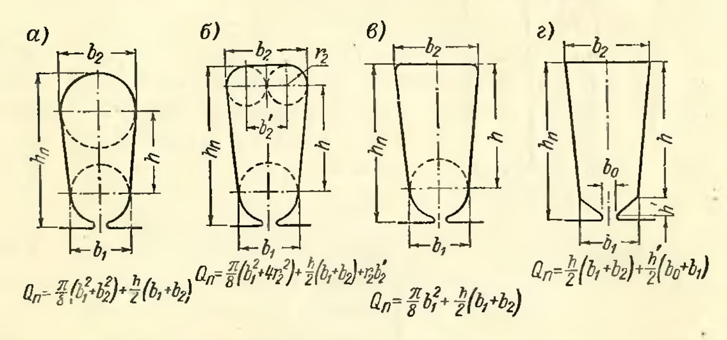


Рис. 3. Размеры нанболее употребительных форм пазов **статора.**

Размеры, которые должны быть измерены в пазах этих форм, проставлены на рисунках стрелками. Лучший способ измерения — снятие оттиска паза на свинце или на картоне и обмер этого оттиска чертежным циркулем и десятичным масштабом; точность измерения должна быть не меньше 0,1 *мм*. Рекомендуется получать оттиск вдавливанием, но не ударом, так как при ударе он сбивается и теряет точность. Из всех размеров паза наиболее важна его полная глубина $h_п$.

7. Ширина зубца $b_з$. В большинстве двигателей мощностью до 100 *квт* пазы имеют наклонные стенки. Наклон стенок подбирается так, чтобы ширина зубца по всей высоте стенки паза (т. е. по размеру h на рис. 3) была одной и той же. Она может быть измерена как непосредственно — штангенциркулем, так и по оттиску паза. В тех редких случаях, когда пазы статора имеют параллельные стенки, ширину зубца $b_з$ следует брать услов-

но на одной трети высоты зубца, считая от внутренней поверхности статора (рис. 4).

8. Число $n_к$ и ширина $b_к$ поперечных вентиляционных каналов или число рядов $m_к$ и диаметр $d_к$ продольных вентиляционных каналов статора (если они имеются).

9. Толщина листов стали сердечника Δ; определяется подсчетом числа листов на какой-нибудь длине, например 10 *мм*. В большинстве случаев листы имеют толщину 0,5 *мм*, значительно реже — 0,35 *мм*.

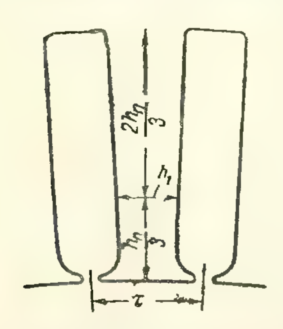


Рис. 4. Определение расчетной ширины зубца при пазах с параллельными стенками.

10. Род изоляции листов стали. Осторожно отгибая крайние листы в зубцах, следует определить, чем они изолированы друг от друга: бумагой, лаком или только естественной окалиной.

Чем точнее определены все эти размеры, тем правильнее будет расчет; поэтому самые важные размеры — диаметр D, длину $l_п$, размеры пазов следует определять в нескольких разных местах, чтобы избежать возможных ошибок однократного измерения.

Кроме того, следует определить, к какому исполнению относится данный двигатель в отношении его охлаждения или вентиляции. Они могут быть следующими:

а) закрытое исполнение без обдува наружной поверхности; самое слабое охлаждение внутренних частей, только за счет естественной отдачи тепла с наружной поверхности корпуса;

б) закрытое исполнение с обдувом наружной поверхности вентилятором на валу двигателя, причем обычно корпус двигателя снабжается продольными ребрами, вдоль которых движется воздух; более энергичное охлаждение внутренних частей за счет усиленной отдачи тепла с наружной поверхности;

в) открытое (или защищенное от капель) исполнение с протяжной вентиляцией, создаваемой вентилятором на валу двигателя; самое распространенное исполнение, обеспечивающее достаточно хорошее охлаждение внут-

ренних частей двигателя непосредственно проходящим через него воздухом;

г) открытое (или защищенное от капель) исполнение с усиленной вентиляцией, создаваемой двумя вентиляторами по обеим сторонам ротора; обычно применяется только в наиболее быстроходных двигателях.

Иногда встречается также закрытое исполнение с пристроенным воздухоохладителем и двумя вентиляторами — внутренним и наружным. Внутренний вентилятор заставляет воздух внутри машины омывать ее внутренние части и затем проходить через воздухоохладитель, где он охлаждается воздухом, прогоняемым через воздухоохладитель при помощи наружного вентилятора. По степени охлаждения такое исполнение занимает промежуточное положение между закрытым с обдувом наружной поверхности и открытым (или защищенным) с протяжной вентиляцией.

Тип охлаждения имеет важное значение для расчета потому, что чем лучше охлаждаются внутренние части двигателя, тем более высокие электрические и магнитные нагрузки могут быть в них допущены, а потому тем больше может быть мощность двигателя.

3. КАК НУЖНО ОБРАБАТЫВАТЬ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБМЕРА СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА?

Когда обмер сердечника статора закончен и известны все размеры, перечисленные в предыдущем параграфе, следует произвести некоторые подсчеты.

1. Прежде всего нужно определить так называемое полюсное деление. Оно представляет длину части окружности расточки статора, приходящейся на долю одного полюса (рис. 5), и обозначается греческой буквой τ (тау). Так как диаметр расточки равен D, а длина ее окружности πD, то на долю каждого из $2p$ полюсов приходится:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad [мм].$$

2. Далее должна быть определена расчетная длина статора в осевом направлении l. Если в статоре

нет поперечных вентиляционных каналов, то она принимается равной измеренной осевой длине:

$$l = l_п \ [мм];$$

если же в статоре имеется $n_к$ поперечных каналов с шириной $b_к$, то их нужно вычесть из измеренной длины:

$$l = l_п - n_к b_к \ [мм].$$

3. Если перемножить полюсное деление τ на расчетную длину l, то получится площадь, занимаемая одним полюсом магнитного поля, или *площадь полюсного деления*

$$Q_в = \tau l \ [мм^2].$$

4, 5. При одной и той же расчетной длине статора l количество стали зависит от толщины ее листов и рода изоляции между ними; *чистая длина стали статора* l_0 всегда несколько меньше расчетной длины l, поэтому первую можно получить из второй умножением на коэффициент k_0, меньший единицы (табл. 1):

$$l_0 = k_0 l \ [мм].$$

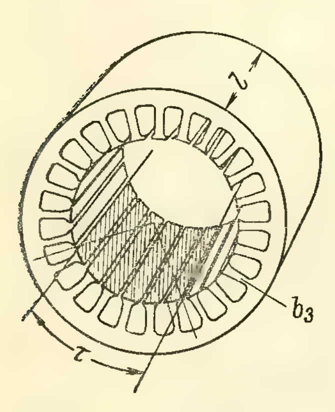


Рис. 5. Полюсное деление (случай четырехполюсного статора).

6. Если при обмере не была непосредственно измерена *высота тела статора* $h_с$, то ее можно получить, если известен наружный диаметр статора $D_н$, его внутренний диаметр D и полная глубина паза $h_п$:

$$h_с = \frac{1}{2}(D_н - D - 2h_п) \ [мм].$$

Таблица 1

Значения коэффициента k_0

Толщина листов Δ, *мм*	Род изоляции листов		Без изоляции
	бумага	лак	
0,5	0,90	0,93	0,95
0,35	0,87	0,90	0,93

7. Отсюда можно подсчитать площадь поперечного сечения стали тела статора $Q_с$; если в статоре нет продольных вентиляционных каналов, то она получается перемножением высоты тела статора $h_с$ на чистую длину стали $l_о$:

$$Q_с = h_с l_о \ [мм^2] .$$

Если же в статоре имеется ряд продольных вентиляционных каналов с диаметром $d_к$, то из высоты тела статора $h_с$ нужно сначала вычесть две трети этого диаметра:

$$Q_с = (h_с - \frac{2}{3} d_к) l_о \ [мм^2] .$$

В более крупных двигателях, в особенности быстроходных (на 3000 *об/мин*), может быть не один, а несколько ($m_к$) рядов вентиляционных каналов; тогда из высоты тела статора нужно вычесть две трети от суммы диаметров каналов всех рядов (каждый из $m_к$ рядов может иметь свой диаметр каналов).

8. По заданному числу пар полюсов p и сосчитанному числу зубцов Z_1 определяется так называемое число пазов на полюс и фазу q по формуле:

$$q = \frac{Z_1}{6p} .$$

Число пазов на полюс и фазу q может быть не только целым, но и дробным.

В табл. 2 приведены числа пазов на полюс и фазу, которые могут получиться для одной, двух, трех и четырех пар полюсов при тех числах зубцов Z_1, которые встречаются в двигателях отечественного происхождения. В квадратные скобки в этой таблице заключены числа пазов на полюс и фазу, которые не следует применять без крайней нужды, так как при них двигатель по тем или иным причинам не получится хорошим; значение круглых скобок объяснено ниже, при рассмотрении типов обмоток.

9. По числу пазов на полюс и фазу q, ширине зубца $b_з$ и чистой длине стали $l_о$ можно определить площадь поперечного сечения стали зубцов:

$$Q_з = 3 q b_з l_о \ [мм^2].$$

Таблица 2

Числа пазов на полюс и фазу

Число полюсов	Общее число зубцов Z_1											
	12	18	24	27	30	36	42	45	48	54	60	72
2	[2]	3	4	$(4^1/_2)$	5	6	[7]	$[7^1/_2]$	[8]	—	—	—
4	[1]	$1^1/_2$	2	$(2^1/_4)$	$2^1/_2$	3	$3^1/_2$	$(3^3/_4)$	4	$4^1/_2$	5	6
6	—	[1]	—	$(1^1/_2)$	—	2	—	$(2^1/_2)$	—	3	—	4
8	—	—	[1]	—	$(1^1/_4)$	$1^1/_2$	$(1^3/_4)$	—	2	$(2^1/_4)$	$2^1/_2$	3

10. На основании обмера пазов вычисляется площадь поперечного сечения паза $Q_п$; формулы для подсчета этой площади приведены на рис. 3 для каждой формы паза.

Пример 1. Обмер сердечника статора двигателя, имеющего защищенное исполнение с одним вентилятором на валу, дал следующие результаты:

1. Диаметр внутренний $D = 152$ *мм.*
2. Диаметр наружный $D_н = 245$ *мм.*
3. Высота тела статора не могла быть измерена.
4. Полная длина по дну пазов $Z_п = 140$ *мм.*
5. Число зубцов $Z_1 = 36$.
6. Паз по рис. 3, *в* с размерами по оттиску:

$h_п = 24{,}75$ *мм*;
$b_1 = 7{,}4$ *мм*;
$b_2 = 10{,}8$ *мм*;
$h = 20{,}3$ *мм.*

7. Ширина зубца по обмеру $b_з = 6{,}6$ *мм.*
8. Вентиляционных каналов никаких нет
9. На длине 10 *мм* насчитывается около 19 листов стали, следовательно толщина листа $\Delta = 0{,}5$ *мм.*
10. При отгибании зубцов никакой изоляции между листами не обнаружено.

Требуется намотать данный статор на две пары полюсов ($p = 2$) для работы в сетях 220 и 380 *в.* Обработка результатов обмера дает:

1. Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{3{,}14 \cdot 152}{2 \cdot 2} = 119{,}3 \text{ мм.}$$

2. Расчетная длина (ввиду отсутствия поперечных вентиляционных каналов равна полной длине)

$$l = l_{п} = 140 \text{ мм}.$$

3. Площадь полюсного деления

$$Q_{в} = \tau l = 119{,}3 \cdot 140 = 16\,700 \text{ мм}^2.$$

4. Коэффициент заполнения стали по табл. 1

$$k_{0} = 0{,}95.$$

5. Чистая длина стали статора

$$l_{0} = k_{0} l = 0{,}95 \cdot 140 = 133 \text{ мм}.$$

6. Высота тела статора

$$h_{с} = \frac{1}{2}(D_{н} - D - 2h_{п}) = \frac{1}{2}(245 - 152 - 2 \cdot 24{,}75) = 21{,}75 \text{ мм}.$$

7. Площадь поперечного сечения стали тела статора

$$Q_{с} = h_{с}\, l_{0} = 21{,}75 \cdot 133 = 2890 \text{ мм}^2.$$

Ввиду отсутствия продольных вентиляционных каналов уменьшать высоту тела статора не требуется.

8. Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{Z_1}{6p} = \frac{36}{6 \cdot 2} = 3.$$

9. Площадь поперечного сечения стали зубцов

$$Q_{з} = 3qb_{з}l_{0} = 3 \cdot 3 \cdot 6{,}6 \cdot 133 = 7900 \text{ мм}^2.$$

10. Площадь поперечного сечения паза (по рис. 3, *в*)

$$Q_{п} = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{h}{2}(b_1 + b_2) = \frac{3{,}14 \cdot 7{,}4^2}{8} + \frac{20{,}3}{2}(7{,}4 + 10{,}8) = 206{,}5 \text{ мм}^2$$

4. КАКОЙ ТИП ОБМОТКИ НУЖНО ВЫБРАТЬ?

Для статоров асинхронных двигателей до 100 *квт* находят применение три типа обмотки:

а) однослойная катушечная;

б) однослойная цепная;

в) двухслойная.

Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, которые в значительной степени определяют области применения этих типов.

На рис. 6, 7 и 8 представлены схемы однослойных катушечных обмоток для двух, трех и четырех пар полюсов, выполненных при одном и том же числе зубцов $Z_1 = 36$; поэтому числа пазов на полюс и фазу q у них разные —

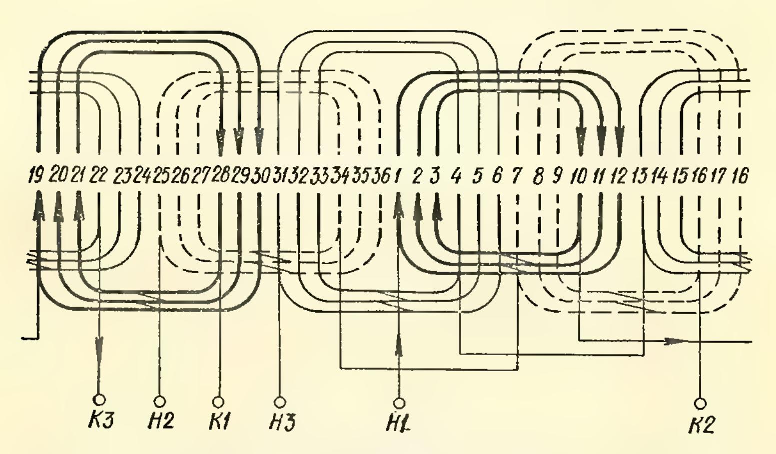


Рис. 6. Схема однослойной катушечной обмотки для двух пар полюсов.

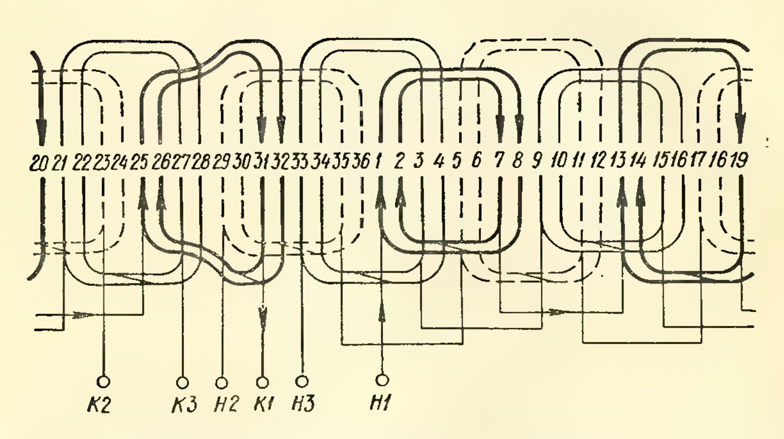


Рис. 7. Схема однослойной катушечной обмотки для трех пар полюсов.

соответственно 3, 2 и $1^1/_2$. Из этих рисунков видно, что отдельные секции имеют различную форму, причем число таких форм равно удвоенному числу пазов на полюс и фазу. Кроме того, при всяком нечетном числе пар полюсов (в данном случае при $p = 3$) обмотка имеет одну группу секций переходной формы.

Достоинством обмоток этого типа является их большая наглядность, благодаря которой очень легко производить соединение отдельных секций и групп секций между собой, не рискуя ошибиться.

Недостатков же у обмоток этого типа довольно много.

Во-первых, для заготовки секций обмотки нужно иметь $2q$ разных шаблонов, а при нечетном числе пар полюсов нужно добавить еще q шаблонов для секций переходной группы, что при единичном выполнении обмотки очень невыгодно.

Во-вторых, лобовые части катушечной обмотки имеют относительно большую длину и требуют довольно много места, которого может не быть под щитами машины.

В-третьих, данный тип обмотки неблагоприятен для применения параллельных ветвей. В крайнем случае при целых числах пазов на полюс и фазу можно соединить параллельно p групп секций в каждой фазе, но это не будет хорошо, потому что вследствие различной формы и длины секций разных групп их сопротивления переменному току будут различны и токи могут распределяться между ними неравномерно.

Однако применение однослойной катушечной обмотки может быть рекомендовано, не взирая на все ее недостатки, для машин с одной парой полюсов при четном числе пазов на полюс и фазу. На рис. 9 представлена схема такой обмотки. У нее количество форм секций еще больше, потому что каждая фаза имеет секции своей формы, и для их заготовки нужно иметь $\frac{3q}{2}$ шаблонов; но, во-первых, лобовые части такой обмотки могут иметь меньший вылет в направлении оси машины, чем в обмотках других типов при этом же числе полюсов, а во-вторых, каждая фаза обмотки по рис. 9 состоит из двух совершенно одинаковых групп секций, которые при необходимости могут быть соединены параллельно.

Однослойная цепная обмотка для двух, трех и четырех пар полюсов изображена на схемах рис. 10, 11 и 12.

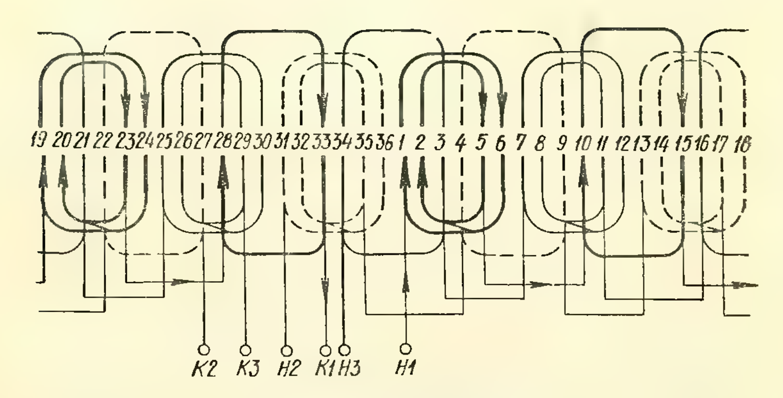


Рис. 8. Схема однослойной катушечной обмотки для четырех пар полюсов.

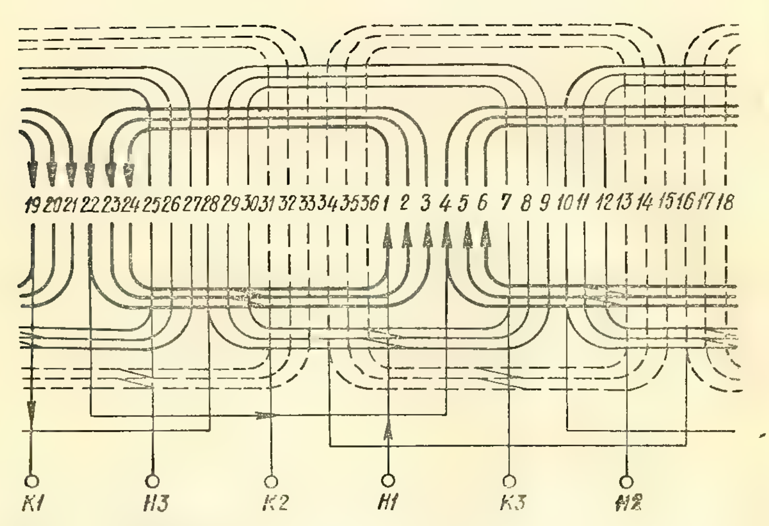


Рис. 9. Схема однослойной катушечной обмотки для одной пары полюсов.

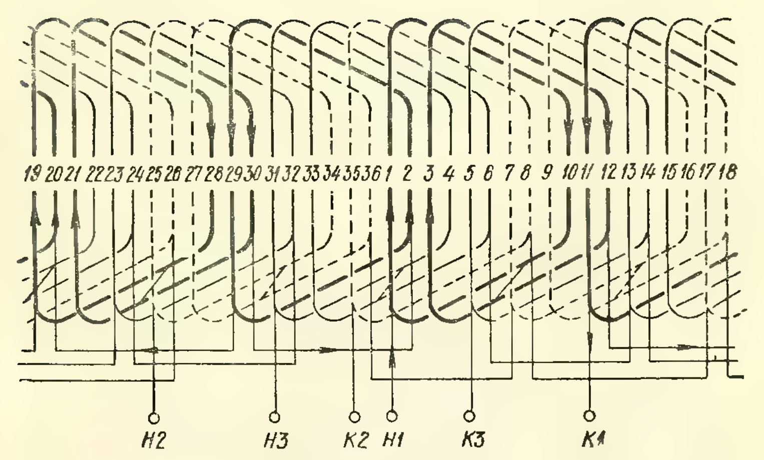


Рис. 10. Схема однослойной цепной обмотки для двух пар полюсов.

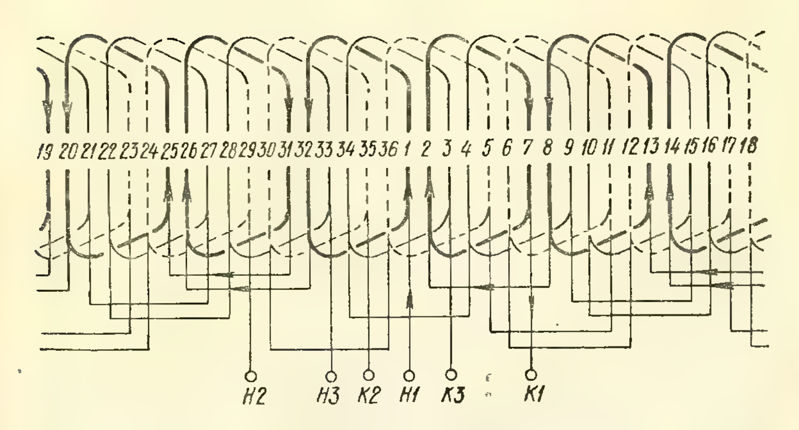


Рис. 11. Схема однослойной цепной обмотки для трех пар полюсов.

Из них видно, что все секции каждой обмотки имеют совершенно одинаковую форму, следовательно могут быть изготовлены на одном и том же шаблоне; это представляет первое преимущество обмоток такого типа.

Вторым преимуществом является возможность применения большего числа параллельных ветвей, чем в катушечных обмотках; при любом целом числе пазов на полюс и фазу число параллельных ветвей может быть

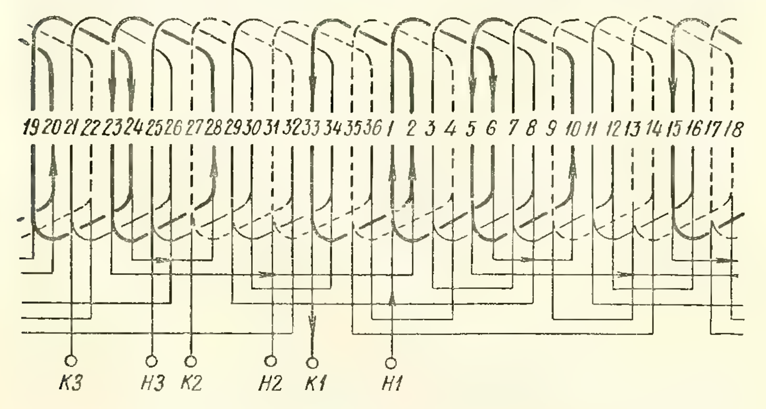


Рис. 12. Схема однослойной цепной обмотки для четырех пар полюсов.

доведено здесь до числа пар полюсов, а при четных числах пазов на полюс и фазу — до числа полюсов.

Недостатками цепной обмотки являются: во-первых, ее малая наглядность — поскольку все секции одинаковы, необходимо повышенное внимание при выполнении соединений; во-вторых, трудность выгибания лобовых частей при выходе из паза для обхода лобовых частей соседних секций; и, в-третьих, значительная длина лобовых частей, требующая большей затраты проводника, чем в обмотках других типов.

Этот последний недостаток может быть несколько уменьшен путем применения так называемого укорочения шага. Под шагом *y* секции обмотки статора машины переменного тока понимается число охватываемых ею зубцов. Особенностью цепной обмотки является то, что если левые стороны ее секций лежат, например, в пазах с нечетным номерами, то правые обязательно должны ле-

жать в пазах с четными номерами. Отсюда следует, что шаг секций цепной обмотки всегда является нечетным числом. При целых нечетных числах пазов на полюс и фазу неукороченный шаг цепной обмотки равен утроенному числу пазов на полюс и фазу:

$$y = 3q.$$

При целых четных числах пазов на полюс и фазу это дало бы четное число, поэтому шаг берется на единицу меньше:

$$y = 3q - 1.$$

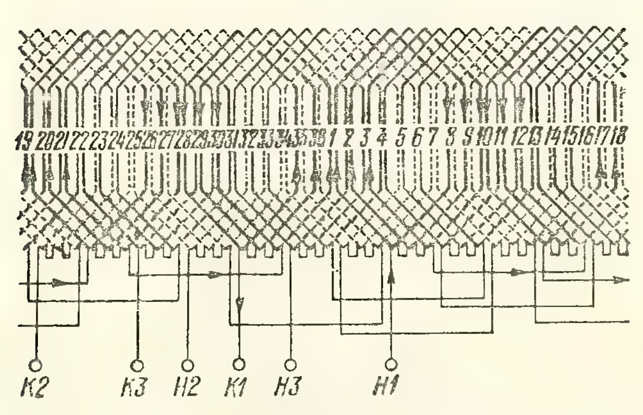


Рис. 13. Схема двухслойной обмотки для двух пар полюсов.

Оставляя все левые стороны секций в тех же пазах, можно перенести все правые стороны на 2, на 4 и т. д. пазов, что и дает укорочение шага. Оно значительно уменьшает длину лобовых частей.

Схемы двухслойных обмоток для тех же чисел пар полюсов даны на рис. 13, 14 и 15. Первый взгляд на эти схемы обнаруживает самый главный недостаток обмоток этого типа — их сложность, происходящую вследствие того, что число секций двухслойной обмотки всегда вдвое больше, чем в любом другом типе.

В каждом пазу здесь лежат стороны двух секций, которые далеко не всегда принадлежат к одной и той же фазе. Как следствие, отсюда вытекает второй недоста-

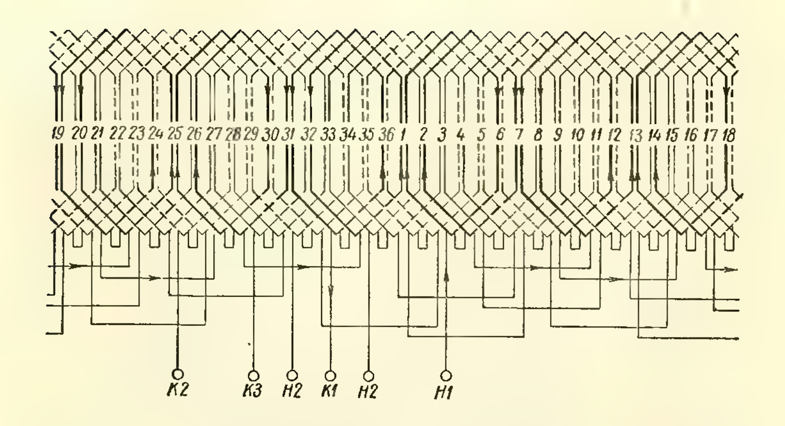


Рис. 14. Схема двухслойной обмотки для трех пар полюсов.

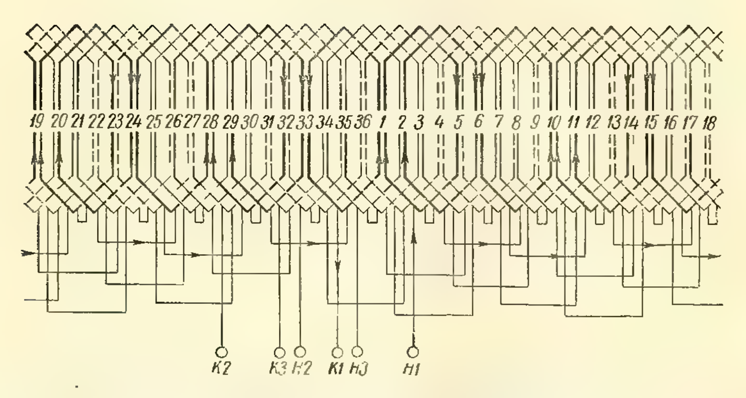


Рис. 15. Схема двухслойной обмотки для четырех пар полюсов.

ток — необходимость изоляционной прокладки в пазу между сторонами секций, которая отнимает часть поперечного сечения паза.

Зато двухслойная обмотка обладает рядом ценных преимуществ. Во-первых, все ее секции, как и секции цепной обмотки, имеют одинаковую форму и изготовляются на одном шаблоне; но в отличие от цепной обмотки, их лобовым частям не нужно придавать сложного выгиба.

Во-вторых, двухслойная обмотка может быть выполнена при всех числах пазов на полюс и фазу, указанных в табл. 2, в то время как однослойные обмотки не допускают применения чисел, заключенных в круглые скобки.

В-третьих, число параллельных ветвей при всяком целом числе пазов на полюс и фазу может быть доведено до $2p$.

В-четвертых, шаг двухслойной обмотки может быть как нечетным, так и четным числом. Рекомендуется принимать его по возможности близким к величине

$$y = 2{,}4\,q \quad \text{или} \quad \frac{y}{q} = 2{,}4\,.$$

Исключение представляют обмотки для машин с одной парой полюсов, в которых вследствие чрезмерно большого вылета лобовых частей иногда приходится применять более короткий шаг:

$$\text{от } y = 1{,}5\,q \text{ до } y = 2\,q\,.$$

Разумеется, шаг может быть только целым числом; поэтому его значение необходимо округлять до ближайших целых чисел.

Двухслойная обмотка может быть рекомендована для применения как основной тип обмотки; однако в машинах с одной парой полюсов может оказаться более целесообразным применение катушечной обмотки типа рис. 9. В небольших машинах (примерно до 10 *квт*) может применяться цепная обмотка; но для более крупных машин ее рекомендовать не следует. Применение катушечных обмоток для многополюсных машин целесообразно при невысокой квалификации обмотчиков, так как облегчает выполнение соединений и его проверку.

При составлении схем обмоток любого типа следует придерживаться некоторых правил.

Прежде всего рекомендуется начинать с построения схемы при последовательном соединении всех секций каждой фазы, даже если предполагается в дальнейшем применить параллельные ветви. Это дает возможность разметить стрелками направления обхода какой-либо фазы от начала к концу, как показано на всех приведенных здесь схемах. Каждая фаза содержит $2p$ участков схемы, на которых сгруппированы стороны секций данной фазы; направления обхода всех этих сторон секций должны совпадать друг с другом в пределах каждого участка и должны быть противоположны направлениям обхода на соседних участках. Если это условие соблюдено, то дальше не представит особой трудности превратить последовательное соединение в параллельное, лишь бы сохранялись направления обхода. Конечно, все параллельные ветви должны состоять из одинакового числа секций, и секции в каждой ветви должны быть расположены одинаковым образом по отношению друг к другу и к секциям других фаз.

Когда выполнены соединения одной фазы, не представляет затруднений выполнить соединения и для двух остальных фаз. Начало первой фазы может быть выбрано произвольно; но начала прочих фаз должны располагаться так, чтобы между каждыми двумя началами было $2q$, либо $4q$ зубцов. Тогда все прочие соединения этих фаз будут совершенно подобны соединениям первой фазы, сдвинутым на столько же зубцов.

Схемы обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу составляются так, что в каждой фазе чередуются в определенном порядке группы, состоящие из тех двух целых чисел секций, между которыми заключено данное дробное число. Так, например, при $q = 2^1/_2$ в обмотке попеременно чередуются группы из двух и из трех секций; при $q = 2^1/_4$ после каждых трех групп из двух секций следует одна группа из трех секций и т. д. Некоторое отступление от этого порядка имеет место только в цепных обмотках; характер построения их схем при дробном числе пазов на полюс и фазу виден из рис. 12.

Пример 2. Для двигателя из предыдущего примера следует выбрать тип обмотки.

Так как число пазов на полюс и фазу ($q = 3$) целое, то может быть применена обмотка любого типа; рассмотрим четыре варианта:

а) однослойная катушечная обмотка,

б) однослойная цепная обмотка с неукороченным шагом,
в) однослойная цепная обмотка с укороченным шагом,
г) двухслойная обмотка.

Так как число пазов на полюс и фазу здесь нечетно, то неукороченный шаг цепной обмотки

$$y = 3q = 3 \cdot 3 = 9 \text{ (из первого паза в десятый)}$$

Укороченный шаг при цепной обмотке обязательно должен быть нечетным; можно рассмотреть значение $y = 7$ и $y = 5$. Первое из них дает

$$\frac{y}{q} = \frac{7}{3} = 2{,}33,$$

т. е. величину, весьма близкую к рекомендованной для двухслойных обмоток; второе значение дает

$$\frac{y}{q} = \frac{5}{3} = 1{,}67,$$

что при одной паре полюсов еще могло бы быть принятым, но для двух пар явно мало.

Двухслойная обмотка тоже может быть принята с шагом $y = 7$ (из первого паза в восьмой), но можно взять и шаг $y = 8$ (из первого паза в девятый), так как шаг двухслойной обмотки не должен быть обязательно нечетным. Это дало бы

$$\frac{y}{q} = \frac{8}{3} = 2{,}67,$$

что несколько больше отличается от рекомендуемого отношения и потому менее целесообразно.

Окончательный выбор типа обмоткн может быть сделан на основании дополнительных соображений при дальнейшем ходе расчета.

5. КАК ОПРЕДЕЛИТЬ ЧИСЛО ВИТКОВ В ФАЗЕ?

Чтобы двигатель после перемотки отдавал как можно более высокую мощность, нужно стремиться иметь как можно большее сечение проводников обмотки; но так как место в пазах ограничено, увеличение сечения может быть достигнуто только за счет уменьшения числа витков. А чем меньше будет число витков в фазе, тем выше получатся магнитные нагрузки в машине. Поэтому уменьшение числа витков должно быть ограничено таким разумным пределом, при котором магнитные нагрузки еще не превышают допустимых; а это может быть установлено только сравнением с удачно рассчитанными двигателями.

Мерой магнитных нагрузок служит так называемая магнитная индукция, измеряемая единицей, носящей название гаусс (*гс*).

В различных частях двигателя магнитная индукция не должна по возможности превышать определенных значений, установленных практикой. При расчете обмотки статора должны быть приняты во внимание индукции в трех участках машины:

а) индукция в воздушном зазоре между статором и ротором $B_в$ нормально находится в пределах от 5000 до 9000 *гс*;

б) индукция в зубцах статора $B_з$ должна находиться в пределах от 14 000 до 16 000—17 000 *гс*;

в) индукция в теле статора $B_с$ не должна превосходить 12 000—15 000 *гс*.

Эти три условия далеко не всегда могут быть удовлетворены одновременно; однако и роль их при различных числах полюсов неодинакова.

Для двухполюсных двигателей самое важное значение имеет индукция в теле статора; наоборот, для двигателей с большими числами полюсов следует обращать внимание преимущественно на индукцию в зубцах. Как правило, чем двигатель крупнее и чем сильнее он вентилируется, тем более высокие значения индукции можно для него выбирать; наоборот, чем слабее охлаждение двигателя и чем он меньше, тем меньшие значения индукции могут быть для него допущены.

Обычно бывает удобно начинать подбор значения индукции с воздушного зазора. Задавшись каким-либо значением этой индукции, можно определить значения остальных индукций по формулам:

для индукции в зубцах

$$B_з = \frac{Q_в}{Q_з} B_в \ [гс],$$

для индукции в теле статора

$$B_с = \frac{0{,}32\, Q_в}{Q_с} B_в \ [гс],$$

где: $Q_в$ — площадь полюсного деления;

$Q_з$ — площадь поперечного сечения стали зубцов;

$Q_с$ — площадь поперечного сечения стали тела статора.

Если первая проба не дала сразу удовлетворительного результата, следует соответственно исправить значение индукции в зазоре $B_в$ и снова произвести проверку.

Когда выбрано удовлетворительное значение индукции в зазоре, число последовательно включенных витков в фазе может быть определено по формуле:

$$w = \frac{68\,600\,000\ U_ф}{k\,B_в\,Q_в},$$

где: $U_ф$ — фазное напряжение обмотки;
k — так называемый обмоточный коэффициент, величина которого может быть взята в зависимости от числа пазов на полюс и фазу и шага по табл. 3 и 4.

Таблица 3

Обмоточные коэффициенты однослойных обмоток

q	Катушечные обмотки	Цепные обмотки при шаге y, равном:							
		3	5	7	9	11	13	15	17
$1^1/_2$	0,960	0,831	0,945	—	—	—	—	—	—
2	0,966	0,707	0,966	—	—	—	—	—	—
$2^1/_2$	0,957	—	0,829	0,951	—	—	—	—	—
3	0,960	—	0,735	0,902	0,960	—	—	—	—
$3^1/_2$	0,956	—	—	0,828	0,932	0,953	—	—	—
4	0,958	—	—	0,766	0,892	0,958	—	—	—
$4^1/_2$	0,955	—	—	—	0,827	0,915	0,954	—	—
5	0,957	—	—	—	0,774	0,874	0,936	0,957	—
6	0,956	—	—	—	—	0,786	0,870	0,927	0,956

Если расчет производится для ненормальной частоты f, число витков, полученное по этой формуле, должно быть умножено еще на $50 : f$.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что вне зависимости от соединения фаз, которое предполагается иметь в обмотке, напряжение $U_ф$ должно быть взято непременно фазное.

Если рабочим соединением фаз обмотки должно служить соединение в треугольник (рис. 16), то фазное напряжение равно линейному:

$$U_ф = U_л.$$

Таблица 4

Обмоточные коэффициенты двухслойных обмоток

q	Шаг обмотки y, равный:												
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$1\frac{1}{4}$	0,910	0,951	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$1\frac{1}{2}$	0,831	0,945	0,945	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	0,683	0,837	0,933	0,966	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$2\frac{1}{4}$	—	0,766	0,877	0,941	0,954	—	—	—	—	—	—	—	—
$2\frac{1}{2}$	—	0,711	0,829	0,910	0,951	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	0,735	0,831	0,902	0,945	0,960	—	—	—	—	—	—
$3\frac{1}{2}$	—	—	—	0,747	0,828	0,890	0,932	0,953	—	—	—	—	—
$3\frac{3}{4}$	—	—	—	0,710	0,792	0,859	0,908	0,941	0,955	—	—	—	—
4	—	—	—	0,677	0,760	0,829	0,885	0,925	0,949	0,958	—	—	—
$4\frac{1}{2}$	—	—	—	—	0,695	0,766	0,827	0,877	0,915	0,941	0,954	—	—
5	—	—	—	—	—	0,711	0,774	0,829	0,874	0,910	0,936	0,951	0,957
6	—	—	—	—	—	—	0,676	0,732	0,783	0,828	0,867	0,898	0,924

Если же предполагается иметь рабочее соединение в звезду, то при нем фазное напряжение в 1,73 раза меньше линейного (рис. 17):

$$U_{ф} = \frac{U_{л}}{1{,}73},$$

или же

$$U_{л} = 1{,}73\, U_{ф}.$$

Однако число витков, сосчитанное таким образом, еще не является окончательным. Все секции обмотки

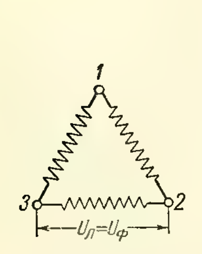


Рис. 16. Соединение фаз в треугольник.

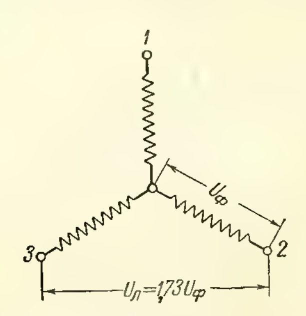


Рис. 17. Соединение фаз в звезду.

должны состоять из одного и того же числа витков; поэтому необходимо, чтобы найденное число витков делилось без остатка на число секций, находящихся в последовательном соединении; а это число зависит от числа параллельных ветвей.

Если предполагается соединить все секции данной фазы последовательно, то число таких секций в каждой фазе будет:

при однослойных обмотках — $Z_1 : 6$;

при двухслойных обмотках — $Z_1 : 3$.

Но если применить соединение секций каждой фазы в a параллельных ветвей, то число последовательно соединенных секций в каждой параллельной ветви каждой фазы будет в a раз меньше:

при однослойных обмотках — $Z_1 : 6a$;

при двухслойных обмотках — $Z_1 : 3a$.

В более мелких машинах, где и при последовательном соединении число витков в каждой секции насчитывается десятками, нет надобности в применении нескольких параллельных ветвей. Но в более крупных машинах число витков каждой секции ограничивается немногими единицами, так что увеличение или уменьшение на один виток совершенно изменяет принятые магнитные нагрузки; в этом случае применение параллельных ветвей имеет большое значение, так как позволяет увеличить число проводников в каждом пазу в a раз.

Число параллельных ветвей, полученное из расчета, следует уточнить, выбрав два-три ближайших к нему числа, делящихся на число последовательно соединенных секций.

Чтобы произвести сознательный выбор между этими числами, следует проверить, какие значения индукции будут при них получаться, и выбрать окончательно то из них, при котором распределение индукций представляется наиболее благоприятным.

С этой целью прежде всего определяется действительная индукция по формуле:

$$B_в = \frac{68\,600\,000\,U_ф}{k\,w\,Q_в}\ [гс],$$

после чего не представляет затруднений найти индукции в зубцах $B_з$ и в теле статора $B_с$.

Пример 3. Определим число последовательно включенных витков в фазе двигателя из предыдущих примеров при различных вариантах обмотки.

Поскольку двигатель не очень мал и имеет хорошее охлаждение, можно взять для пробы среднее значение индукции в зазоре $B_в = 7000$ *гс*.

Тогда индукция в зубцах

$$B_з = \frac{Q_в}{Q_з} B_в = \frac{16700}{7900}\,7000 = 14800\ гс.$$

и индукция в теле статора

$$B_с = \frac{0{,}32\,Q_в}{Q_с} B_в = 0{,}32\,\frac{16700}{2890}\,7000 = 12950\ гс.$$

И то и другое значение хорошо укладывается в рекомендованные пределы.

Согласно табл. 3, обмоточный коэффициент при числе пазов на полюс и фазу $q = 3$ для однослойной катушечной обмотки и для цепной обмотки с неукороченным шагом $y = 9$ равен $k = 0{,}960$.

Обмотку следует рассчитывать на фазное напряжение $U_ф = 220$ *в*; тогда она будет пригодна для включения в сеть 220 *в* при соединении фаз в треугольник и в сеть 380 *в* при соединении фаз в звезду.

Отсюда число витков

$$w = \frac{68\,600\,000\ U_ф}{k\ B_в\, Q_в} = \frac{68\,600\,000 \cdot 220}{0{,}96 \cdot 7000 \cdot 16\,700} = 134{,}5.$$

Число секций, находящихся в последовательном соединении, при отсутствии параллельных ветвей в однослойных обмотках обоих типов будет

$$\frac{Z_1}{6} = \frac{36}{6} = 6.$$

Ближайшее число витков, кратное числу секций, $w = 132 = 6 \cdot 22$. Полезно испробовать еще два числа: $126 = 6 \cdot 21$ и $138 = 6 \cdot 23$.

Теперь надо проверить, какие индукции получаются при всех этих числах витков. В результате такой проверки получим:

число витков w	126	132	138
индукция в зазоре $B_в$ . . .	7470	7120	6820
» в зубцах $B_з$ . .	15800	15050	14430
» в теле статора $B_с$.	13830	13170	12610

Все три числа витков дают в общем неплохие результаты; но при 126 витках индукция в зубцах и, что особенно важно для машины с небольшим числом полюсов, индукция в теле статора, очень близки к верхним значениям рекомендованных пределов, а при 138 витках индукция в зубцах маловата. Поэтому лучше всего принять 132 витка.

Обмоточный коэффициент для цепной обмотки с шагом $y = 7$ и для двухслойной обмотки с этим же шагом, согласно табл. 3 и 4, равен 0,902. Поэтому те же индукции получились бы при числе витков

$$w = \frac{0.960}{0{,}902} 132 \approx 150 = 6 \cdot 25,$$

Случайно получилось, что это число делится на 6 и потому пригодно для обеих обмоток; если бы оно не было кратным шести, его нужно было бы исправить, как это сделано выше.

Число секций в фазе двухслойной обмотки всегда вдвое больше, чем в однослойной, т. е. в данном случае равно 12; но 150 не делится на 12. Тогда можно поступить двояко:

а) устроить в каждой фазе обмотки две параллельные ветви из шести последовательно соединенных секций по 25 витков;

б) изменить число витков, подобрав ближайшее число, кратное двенадцати, например $w = 144 = 12 \cdot 12$, и соединить все секции последовательно.

6. КАК ВЫБРАТЬ ДИАМЕТР ПРОВОДНИКА?

Часть поперечного сечения паза должна занимать изоляция. Чем она тоньше, тем больше места останется для проводников обмотки, но одновременно тем меньше ее надежность. Однако и чрезмерное увеличение толщины изоляции не приносит пользы.

Наиболее типичный состав изоляции паза представлен на рис. 18. Каждый слой этой трехслойной изоляции имеет свое особое назначение. Собственно изоляцией является средний слой, для которого нужны изоляционные материалы высокого качества. Для двигателей средних мощностей в качестве этого слоя применяется лакоткань толщиной около 0,2 *мм*; в более крупных вместо лакоткани применяется миканит толщиной 0,2—0,3 *мм*, а в самых мелких — шелковая лакоткань толщиной 0,1—0,15 *мм*. Может быть применена также синтетическая пленка примерно тех же толщин.

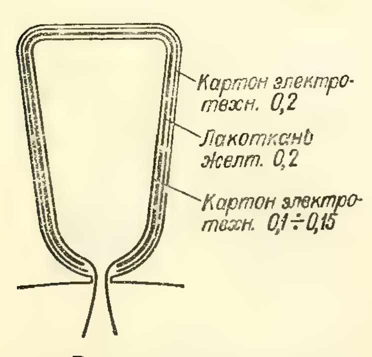


Рис. 18. Изоляция паза.

Самый наружный слой представляет защитную оболочку против повреждений основной изоляции; для него применяется электротехнический картон (прессшпан) толщиной 0,15—0,2 *мм*.

Самый внутренний слой предназначается, во-первых, для предохранения основной изоляции от повреждений изнутри, а во-вторых, служит для защиты проводников от повреждений во время укладки обмотки, для чего он нарезается более широкими полосами, так что края его выступают из паза. Самым лучшим материалом для него является глянцевый (лощеный) электротехнический картон 0,1—0,15 *мм*.

Помимо изоляции часть места в пазу занимает деревянный или фибровый клин, закрывающий отверстие паза.

Кроме того, в двухслойных обмотках применяется междуслойная прокладка из электротехнического картона толщиной 0,3—0,5 *мм* (рис. 19).

Таким образом на долю собственно обмотки остается только часть поперечного сечения паза; и эту часть обмотка не может занять полностью, так как между проводниками неизбежно остаются пустые места.

Коэффициентом заполнения паза $f_п$ называется та доля поперечного сечения паза $Q_п$, которая может быть занята проводниками с их изоляцией. Его величина зависит от формы паза — она тем больше, чем закругленнее очертания паза, и возрастает с увеличением его размеров (следовательно выше у более крупных машин), но почти не зависит от диаметра проводника, и только при очень значительном увеличении последнего заметно уменьшается, так как очень толстые проводники плохо укладываются в паз.

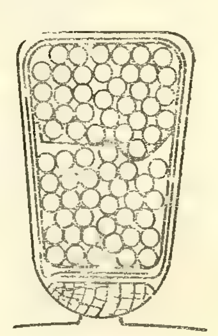


Рис. 19. Разрез паза двухслойной обмотки.

Для пазов по рис. 3, *а* и *б* при однослойной обмотке следует считать $f_п = 0{,}40—0{,}50$, а для пазов по рис. 3, *в* и *г*, $f_п = 0{,}33 — 0{,}40$. Применение двухслойных обмоток понижает значение коэффициента заполнения на 0,04 — 0,05. Таким образом, если в каждом пазу лежит число проводников

$$s_п = \frac{6\,wa}{Z_1},$$

поперечное сечение каждого из них с изоляцией будет:

$$q_и = \frac{Q_п f_п}{s_п} \ [мм^2].$$

Отсюда диаметр проводника с изоляцией

$$d_и = \sqrt{\frac{4\,q_и}{\pi}} \ [мм].$$

Теперь следует выбрать марку проводника, т. е. определить, какую он должен иметь изоляцию. В приложении приведены различные марки проводников круглого сечения, состав и толщина их изоляции при различных диаметрах голой меди. Наиболее употребительной является марка ПЭЛБО, но она изготовляется только для диаметров не менее 0,20 *мм* и не более 2,10 *мм*; поэтому меньшие диаметры приходится брать марки ПЭЛШО, а боль-

шие — марки ПБД. Прочие марки применяются значительно реже.

Если теперь вычесть двухстороннюю толщину изоляции из диаметра с изоляцией $d_и$, то получится диаметр голой меди $d_г$. Однако последний может быть принят только в том случае, если он содержится в табл. В приложения; если же такого диаметра в таблице нет, надо выбрать проводник ближайшего диаметра.

Не следует применять проводники с диаметром более $d_и = 2 \div 2{,}25$ *мм* или с сечением более $q_и = 3$—4 *мм*^{2}, так как их очень трудно укладывать в пазы.

Зачастую возникают большие затруднения из-за того, что в распоряжении производящего перемотку нет достаточно широкого выбора проводников различного диаметра; в особенности это касается случаев более крупных двигателей, когда сечения проводников велики. В этих случаях приходится разбивать проводник на несколько параллельно включенных проводников, причем вовсе не обязательно, чтобы их диаметры были одинаковы; важно лишь, чтобы сумма сечений всех параллельных проводников с их изоляцией была примерно равна сечению $q_и$.

После всего этого нужно проверить, какой получается в итоге коэффициент заполнения паза.

Следует отметить, что квалифицированный обмотчик может укладывать обмотку с заметно более высокими значениями коэффициента заполнения паза, чем указанные выше; но было бы неправильным добиваться этого, во-первых, потому, что при такой укладке производительность обмотчика понижается, а во-вторых, из-за того, что при слишком плотной укладке затрудняется проникновение пропиточного лака внутрь паза, и в результате теплоотдача его ухудшается.

П р и м е р 4. Определим диаметр проводника для обмотки из предыдущих примеров.

Поскольку рассчитываемый двигатель имеет пазы по форме рис. 3, *в*, не очень большие, но и не самые маленькие, можно принять для однослойных обмоток среднее значение коэффициента заполнения паза — около $f_п = 0{,}40$.

При выбранном числе витков в фазе $w = 132$ число проводников в каждом пазу $s_п = 22$. Отсюда сечение одного проводника с изоляцией.

$$q_и = \frac{Q_п f_п}{s_п} = \frac{206{,}5 \cdot 0{,}40}{22} = 3{,}75 \ мм^2$$

Ему соответствует диаметр проводника с изоляцией

$$d_{и} = \sqrt{\frac{4\,q_{и}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3{,}75}{3{,}14}} = 2{,}185 \text{ мм.}$$

Такой диаметр можно было бы допустить в более крупных двигателях; но в данном случае лучше подразделить сечение на два, что даст диаметр

$$d_{и} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3{,}35}{3{,}14 \cdot 2}} = 1{,}55 \text{ мм.}$$

Согласно табл. Б приложения для марки ПЭЛБО двухсторонняя толщина изоляции составляет 0,21 *мм*; следовательно диаметр голой меди будет:

$$d_{г} = 1{,}55 - 0{,}21 = 1{,}34 \text{ мм.}$$

Такого диаметра нет в таблице; но есть очень близкий к нему $d_{г} = 1{,}35$ *мм*, который и можно принять. Увеличение диаметра проводника всего на 0,01 *мм* лишь ничтожно отразится на величине коэффициента заполнения паза. Сечение меди такого проводника $q_{г} = 1{,}431$ *мм*^{2}.

Для цепной обмотки с шагом $y = 7$ при числе витков в фазе $w = 150$ каждый паз будет содержать $s_{п} = 25$ проводников с сечением

$$q_{и} = \frac{206{,}5 \cdot 0{,}40}{25} = 3{,}31 \text{ мм}^2$$

и диаметром

$$d_{и} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3{,}31}{3{,}14}} = 2{,}05 \text{ мм;}$$

тогда диаметр голой меди должен быть

$$d_{г} = 2{,}05 - 0{,}21 = 1{,}84 \text{ мм.}$$

Такого диаметра в таблице нет. Ближайший меньший диаметр — 1,81 *мм*, ближайший больший — 1,95 *мм* (помимо мало употребительного диаметра 1,88 *мм*); сразу можно сказать, что последний не удастся уложить, так как он даст слишком большое увеличение коэффициента заполнения паза — почти до 0,45, что при таком диаметре меди невыполнимо. При меньшем диаметре коэффициент заполнения получится несколько ниже принятого. Дело можно бы исправить, разбив сечение на два; но при этом, несмотря на улучшение коэффициента заполнения, сечение меди станет меньше.

Для двухслойной обмотки с тем же числом витков $w = 150$ и тем же шагом $y = 7$ коэффициент заполнения паза должен быть принят меньшим; крайнее, на что можно пойти — это принять $f_{п} = 0{,}37$. Так как в каждом пазу лежат стороны двух секций, а все секции

должны иметь одинаковые числа витков, здесь сразу нужно начинать с подразделения сечения на две части:

$$q_и = \frac{206,5 \cdot 0,37}{2 \cdot 25} = 1,53 \ мм^2,$$

$$d_и = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,53}{3,14}} = 1,395 \ мм$$

Отсюда $d_г = 1,395—0,21 = 1,185$ *мм*. Ближайшим меньшим диаметром является 1,16 *мм*, ближайшим бо́льшим — 1,25 *мм* (минуя мало употребительный диаметр 1,20 *мм*); очевидно, нужно принять первый из них.

Наличие 25 витков в каждой секции потребует применения двух параллельных ветвей, как это было показано в предыдущем примере. Если же это нежелательно, то можно пойти другим путем — убавить один виток; тогда в каждой секции будет по 12 витков, индукции несколько возрастут, но диаметр проводника можно будет увеличить:

$$q_и = \frac{206,5 \cdot 0,37}{24} = 3,18 \ мм^2$$

$$d_и = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,18}{3,14}} = 2,02 \ мм,$$

$$d_г = 2,02—0,21 = 1,81 \ мм,$$

т. е. значения станут такими же, как было принято для цепной обмотки с шагом $y = 7$.

7. КАК ПОДСЧИТАТЬ ВЕСОВОЙ РАСХОД ПРОВОДНИКА?

Каждая секция обмотки статора состоит из двух пазовых частей с длиной, равной полной длине сердечника $l_п$, и двух лобовых частей, длина которых зависит не только от размеров машины, но и от типа обмотки.

Для обмоток наиболее распространенного типа — двухслойных — длина лобовой части $l_л$ может быть определена по формуле:

$$l_л = KT + L \ [мм],$$

где T — средняя ширина секции. Величины K и L могут быть взяты из табл. 5. Согласно рис. 20

$$T = \frac{\pi (D + h_п) y}{Z_1} \ [мм].$$

Так же может быть определена длина лобовой части для однослойной цепной обмотки, но значения K и L нужно взять на 10—15% больше.

Таблица 5

Значения K и L

Число полюсов $2p$	Сердечник обматывается до запрессовки в корпус		Сердечник обматывается после запрессовки в корпус	
	K	L, *мм*	K	L, *мм*
2	1,25	20	1,30	30
4	1,30	20	1,35	30
6	1,40	20	1,45	30
8	1,50	20	1,55	30

Для катушечной обмотки дать формулу труднее потому, что формы ее лобовых частей очень разнообраз-

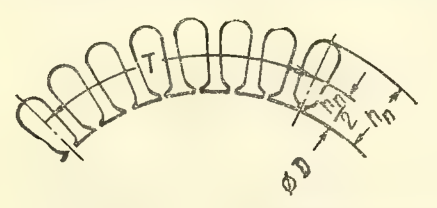


Рис. 20. Определение средней ширины секции.

ны. Приблизительно можно считать для нее в среднем

$$l_\text{л} \approx 1{,}4\tau + \sigma \quad [\textit{мм}],$$

где τ — полюсное деление, а σ — в зависимости от величины машины может быть от 20 до 50 *мм*.

Полная длина среднего витка секции

$$l_\text{в} = 2(l_\text{п} + l_\text{л}) \quad [\textit{мм}].$$

В табл. В приложения дан вес g одного километра проводника всех диаметров без изоляции. Вес меди обмотки без изоляции может быть определен по формуле:

$$G_\text{г} = \frac{3\,w\,a\,l_\text{в}\,g}{1\,000\,000} \quad [\textit{кг}],$$

где w — число последовательно включенных витков в фазе и a — число параллельных ветвей. Если проводник

разбит на несколько параллельно включенных проводников разных диаметров, можно найти вес каждого из них в отдельности и просуммировать их.

Вес проводника с изоляцией, необходимый для отпуска проводника по весу, определяется по формуле:

$$G_и = \left[0{,}876 + 0{,}124 \left(\frac{d_и}{d_г}\right)^2\right] G_г \ [кг].$$

Попутно можно определить сопротивление каждой фазы обмотки в холодном состоянии (при 15° С) по формуле:

$$R = \frac{w\, l_в\, r}{1\,000\,000\, a} \ [ом],$$

где r — сопротивление одного километра проводника данного диаметра при 15° С, указанное в табл. В приложения.

Если обмотка состоит из нескольких параллельных проводников одинакового диаметра, то сопротивление, сосчитанное по этой формуле для одного проводника, следует разделить на число проводников. Если же диаметры отдельных проводников различны, то следует поступить так: разделить единицу на сопротивление километра каждого из проводников, сложить получившиеся дроби (в количестве, равном числу проводников) и разделить единицу на их сумму; результат, подставленный в формулу вместо величины r, даст искомое сопротивление составной обмотки.

Сосчитанная величина сопротивления фазы пригодится для проверки правильности изготовления обмотки.

Пример 5. Средняя длина лобовой части для однослойной катушечной обмотки из предыдущего примера при $\sigma = 35$ *мм* (в среднем)

$$l_л = 1{,}4\tau + \sigma = 1{,}4 \cdot 119{,}3 + 35 = 202 \ мм.$$

Средняя ширина секций обмотки с неукороченным шагом $y = 9$

$$T = \frac{\pi (Q + h_п)\, y}{Z_1} = \frac{3{,}14\ (152 + 24{,}75)\ 9}{36} = 139 \ мм,$$

а для двухслойной обмотки и для цепной обмотки с шагом $y = 7$

$$T = \frac{3{,}14\,(152 + 24{,}75)\ 7}{36} = 108 \ мм.$$

Отсюда длина лобовой части двухслойной обмотки по данным табл. 5 для сердечника, обматываемого после запрессовки в корпус, как это обычно имеет место при перемотке,

$$l_л = KT + L = 1{,}35 \cdot 108 + 30 = 176 \text{ мм}.$$

Для цепной обмотки надо взять K и L несколько увеличенными:

$$l_л = 1{,}5 \cdot 108 + 35 = 197 \text{ мм};$$

а при шаге $y = 9$

$$l_л = 1{,}5 \cdot 139 + 35 = 243 \text{ мм}.$$

Таким образом, самая длинная лобовая часть — у цепной обмотки с неукороченным шагом, а самая короткая — у двухслойной обмотки. Катушечная обмотка и цепная обмотка с укороченным шагом имеют примерно одинаковую, промежуточную длину лобовой части.

Воспользовавшись этими длинами, значениями веса и сопротивления 1 *км* проводника из табл. В приложения и формулами для подсчета веса и сопротивления обмотки, можно произвести сравнение всех вариантов и окончательный выбор одного из них по следующим данным:

Тип обмотки	Число витков в фазе w	Диаметр проводника $d_г$	Сечение одного проводника $q_г$	Длина лобовой части $l_л$	Длина витка $l_в$	Вес 1 *км* проводника g	Вес меди обмотки $G_г$	Сопротивл. 1 *км* проводника r	Сопротивление фазы обмотки R
Катушечная	132	1,35	1,431	202	686	12,73	6,90	12,01	5,44
Цепная, $y = 9$	132	1,35	1,431	243	766	12,73	7,70	12,01	6,08
„ $y = 7$	150	1,81	2,57	197	674	22,9	6,95	6,70	6,78
Двухслойная	144	1,81	2,57	176	632	22,9	6,25	6,70	6,10

Меньше всего меди требует двухслойная обмотка, но самое малое сопротивление имеет катушечная. Менее выгодны оба варианта цепной обмотки, так как один требует больше всего меди, имея сопротивление то же, что и у двухслойной обмотки; другой имеет самое высокое сопротивление при таком же расходе меди, как у катушечной обмотки.

Таким образом приходится выбирать между катушечной и двухслойной обмотками. Если подойти здесь, например, с точки зрения возможности получения двигателя наибольшей мощности, выбор нужно будет остановить на катушечной обмотке, так как сумма сечений двух проводников с диаметром 1,35 *мм* больше сечения одного проводника с диаметром 1,81 *мм*.

Вес проводника с изоляцией для этого варианта обмотки составит

$$G_и = \left[0,876 + 0,124\left(\frac{d_и}{d_г}\right)^2\right] G_г = \left[0,876 + 0,124\left(\frac{1,56}{1,35}\right)^2\right] 6,9 = 7,2\ кг.$$

8. КАКОВА БУДЕТ МОЩНОСТЬ ПЕРЕМОТАННОГО ДВИГАТЕЛЯ?

Точный ответ на вопрос о мощности перемотанного двигателя может дать только его испытание на нагревание под нагрузкой с достаточно тщательно поставленным измерением температуры его частей, в первую очередь— обмотки статора.

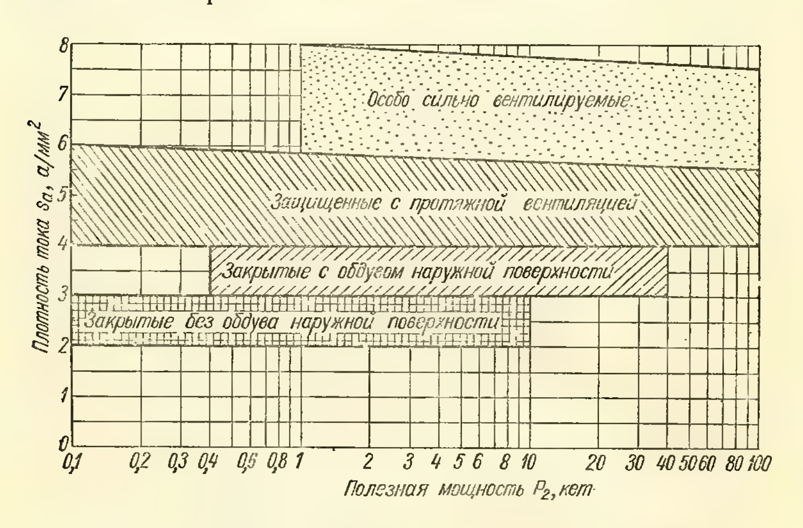


Рис. 21. Допустимая плотность тока в обмотке статора.

Однако еще до выполнения перемотки можно с практически достаточной степенью точности определить мощность, которую сможет отдавать двигатель, путем сравнения с данными опыта, накопленного практикой постройки асинхронных двигателей.

Первым шагом в этом направлении является определение номинального тока по допустимой плотности тока в обмотке статора.

Под плотностью тока понимается количество ампер, которое приходится на один квадратный миллиметр сече-

Таблица 6

Допустимая плотность тока в обмотке статора

Исполнение двигателей в отношении охлаждения	Полезная мощность P_2, *квт*						
	0,1	0,4	1,0	4	10	40	100
Закрытые без обдува наружной поверхности	2,0—3,0	2,0—3,0	2,0—3,0	2,0—3,0	2,0—3,0	—	—
Закрытые с обдувом наружной поверхности	—	3,0—4,0	3,0—4,0	3,0—4,0	3,0—4,0	3,0—4,0	—
Защищенные с протяжной вентиляцией	4,0—6,0	4,0—5,9	4,0—5,8	4,0—5,7	4,0—5,6	4,0—5,5	4,0—5,5
Особо сильно вентилируемые	—	—	5,8—8,0	5,7—7,9	5,6—7,8	5,5—7,6	5,5—7,5

ния проводника обмотки. В табл. 6 и на рис. 21 даны допустимые значения плотности тока в зависимости от мощности двигателя и его исполнения в отношении охлаждения. Из них видно, что допустимая плотность тока почти не зависит от мощности, но очень сильно зависит от системы охлаждения двигателя. Зная исполнение двигателя, не представляет затруднений выбрать предварительное значение плотности тока; при этом не следует рекомендовать выбор по верхнему пределу для данного исполнения — лучше стараться выбирать средние значения плотности тока.

Если обозначить через $s_а$ выбранную плотность тока в амперах на квадратный миллиметр, через q — сечение одного проводника в квадратных миллиметрах и через a — число параллельных ветвей, то номинальный фазный ток двигателя в амперах будет:

$$I_ф = s_а q_г a \quad [a].$$

Если обмотка состоит из нескольких параллельно соединенных проводников одного диаметра, то сюда нужно еще ввести множителем число проводников; если же диаметры проводников различны, то вместо сечения $q_г$ надо подставить сумму сечений всех проводников.

Найденное значение тока позволяет определить кажущуюся (киловольтамперную) мощность, потребляемую двигателем из сети при номинальной нагрузке:

$$P = \frac{3\,U_ф I_ф}{1000} \quad [ква].$$

Чтобы получить отсюда полезную мощность P_2 в киловаттах, развиваемую двигателем на валу, следует умножить P на коэффициент полезного действия (к.п.д.), обозначаемый греческой буквой η (эта) и выражаемый в процентах, и на коэффициент мощности $\cos\varphi$ (косинус фи):

$$P_2 = \frac{P\,\eta\cos\varphi}{100} \quad [квт].$$

В табл. 7 и 8 и на рис. 22 и 23 даны зависимости этих двух величин от кажущейся мощности P, построенные для разных чисел полюсов по действующим в СССР стандартам на асинхронные двигатели.

Таблица 7

Значения коэффициента полезного действия в зависимости от кажущейся мощности

Кажущаяся мощность *P*, *ква*	Ротор короткозамкнутый				Ротор фазовый		
	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$
0,3	63,5	63,5	—	—	—	—	—
0,4	67,5	67,5	—	—	—	—	—
0,5	70,0	70,0	—	—	—	—	—
0,6	72,0	72,0	—	—	—	—	—
0,8	74,5	74,5	—	—	—	—	—
1,0	76,0	76,0	72,0	—	—	—	—
1,5	79,0	79,0	75,5	—	—	—	—
2,0	80,0	80,0	77,5	—	—	—	—
3,0	82,0	82,0	80,0	—	—	—	—
4,0	83,5	83,5	81.5	78,0	80,0	76,0	71,0
5,0	84,0	84,0	82,5	80,0	81,0	78,0	73,5
6,0	85,0	85,0	83,0	81,0	81,0	79,0	75,0
8,0	85,5	85,5	84.5	82,0	83,0	80,5	78,0
10,0	86,0	86,0	85,0	83,0	84,0	81,5	79,0
15	87,0	87,0	86,0	85,0	85,0	83,5	81,5
20	88,0	88,0	87,0	86,0	86,0	84,5	83,0
30	88,5	88,5	88,0	87,0	87,0	86,0	85,0
40	89,0	89,0	88,5	88,0	88,0	87,0	86,0
50	89,5	89,5	89,0	88,5	89,0	87,5	86,5
60	90,0	90,0	89,5	89,0	89,0	88,0	87,0
80	90,5	90,5	90,0	89,5	89,5	89,0	88,0
100	91,0	91,0	90,0	90,0	90,0	89,5	88,0

Примечание. Значения к.п.д. даны с округлением до 0,5%.

Таблица 8

Значения коэффициента мощности (cos φ) в зависимости от кажущейся мощности

Кажущаяся мощность *P*, *ква*	Ротор короткозамкнутый				Ротор фазовый		
	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$
0,3	0,770	0,700	—	—	—	—	—
0,4	0,795	0,720	—	—	—	—	—
0,5	0,810	0,735	—	—	—	—	—
0,6	0,820	0,745	—	—	—	—	—
0,8	0,835	0,760	—	—	—	—	—
1,0	0,840	0,770	0,670	—	—	—	—
1,5	0,855	0,790	0,705	—	—	—	—
2,0	0,860	0,805	0,730	—	—	—	—
3,0	0,870	0,820	0,750	—	—	—	—
4,0	0,875	0,830	0,770	0,690	0,810	0,735	0,670
5,0	0,880	0,840	0,780	0,715	0,820	0,750	0,690
6,0	0,880	0,845	0,790	0,730	0,830	0,755	0,705
8,0	0,885	0,850	0,800	0,760	0,835	0,770	0,725
10,0	0,890	0,860	0,810	0,770	0,840	0,780	0,740
15	0,890	0,870	0 820	0,795	0,850	0,790	0,760
20	0,895	0,870	0,830	0,810	0.860	0,800	0,770
30	0,900	0,880	0,840	0,820	0,865	0,820	0,790
40	0,900	0,880	0,850	0,830	0,870	0,825	0,800
50	0,900	0,885	0,850	0,835	0,875	0,830	0,805
60	0,905	0,885	0,855	0,840	0,880	0,840	0,810
80	0,910	0,890	0,860	0,845	0,880	0,845	0,820
100	0,910	0,890	0,860	0,850	0,885	0,850	0,830

Примечание. Значения cos φ даны с округлением до 0,005.

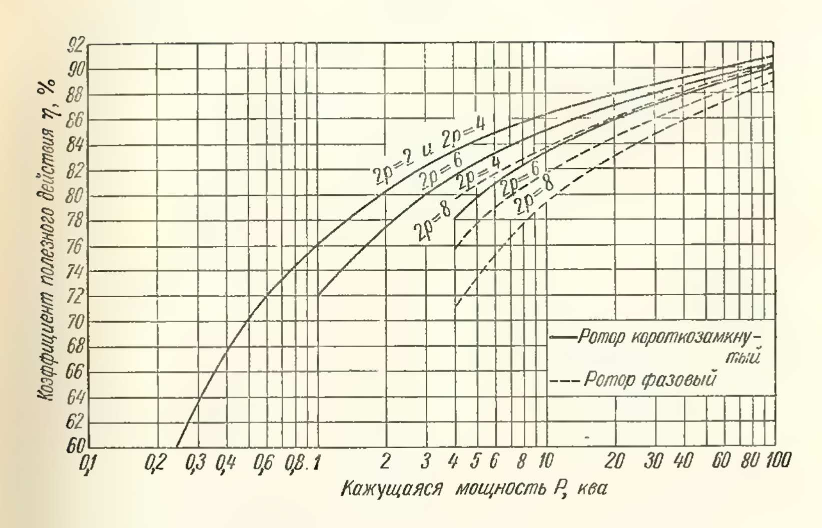


Рис. 22. Зависимость к.п.д. от кажущейся мощности.

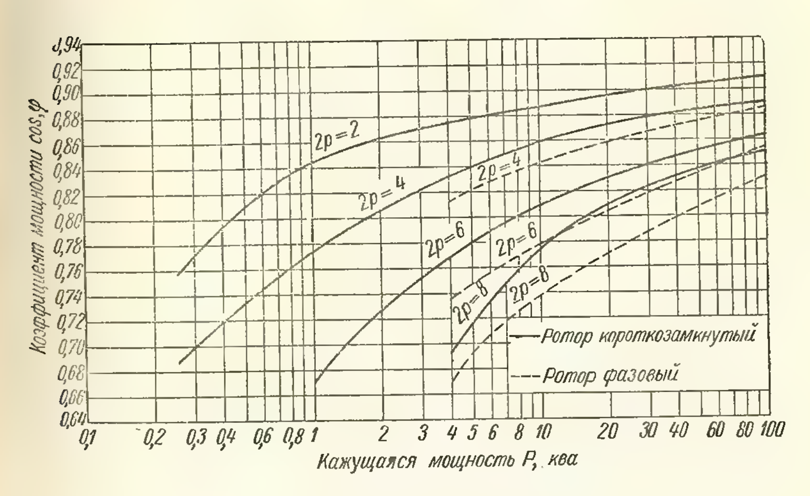


Рис. 23. Зависимость cos φ от кажущейся мощности.

Подсчитанная таким образом мощность зависит от сделанного выбора плотности тока s_a, который отличается известной неопределенностью. Чтобы уточнить значение мощности P_2, следует проверить правильность выбора плотности тока; это можно сделать, подсчитав так называемую линейную нагрузку статора, под которой понимается величина

$$A = \frac{60\, w\, I_ф}{2 p \tau a} \; [а/см];$$

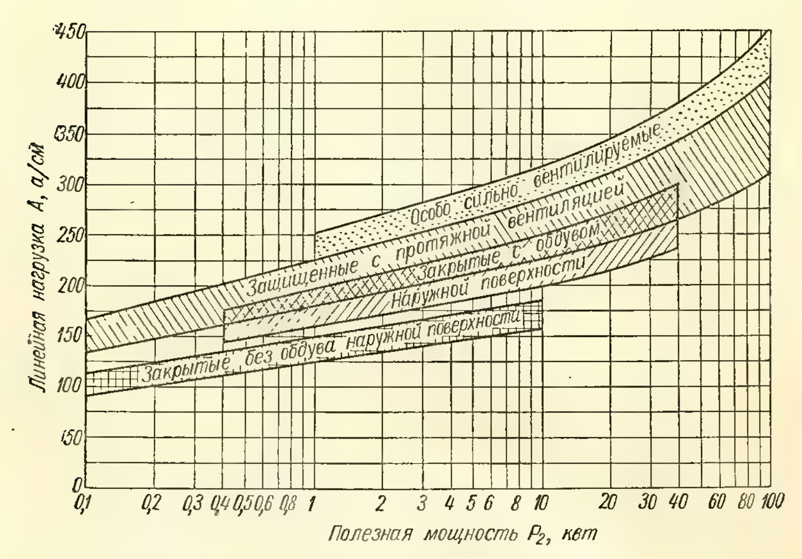


Рис. 24. Допускаемая линейная нагрузка в зависимости от полезной мощности.

здесь w — число последовательно соединенных витков в каждой фазе, $I_ф$ — фазный ток в амперах и τ — полюсное деление в миллиметрах.

В табл. 9 и на рис. 24 дана зависимость допустимой линейной нагрузки от полезной мощности для двигателей различного исполнения. Если линейная нагрузка, подсчитанная по данной формуле, попадает на полосу, заштрихованную в соответствии с исполнением перематываемого двигателя, то выбор плотности тока был произведен достаточно удачно. Если она оказывается лежащей на графике выше этой полосы, то следует считать, что плотность тока выбрана слишком большой и ее сле-

Таблица 9

Допустимая линейная нагрузка в зависимости от полезной мощности

Исполнение двигателей в отношении охлаждения	Полезная мощность P_2, *квт*						
	0,1	0,4	1,0	4	10	40	100
Закрытые без обдува наружной поверхности	90—110	110—135	125—150	145—170	155—185	—	—
Закрытые с обдувом наружной поверхности	—	145—175	160—195	180—230	200—250	235—300	—
Защищенные с протяжной вентиляцией	135—170	160—200	180—225	210—260	225—275	260—345	305—405
Особо сильно вентилируемые	—	—	225—250	260—290	275—320	345—380	405—450

дует уменьшить. Если же, наконец, линейная нагрузка оказывается ниже полосы, то плотность тока выбрана недостаточной, и машина может иметь мощность больше подсчитанной предварительно.

При перемотке двигателя с большего числа пар полюсов на меньшее мощность двигателя увеличивается, однако не всегда одинаковым образом.

Если производится перемотка с трех пар полюсов на две, или с четырех на три (или тоже на две), обычно не возникает препятствий к тому, чтобы примерно сохранить прежнее значение индукции в зазоре. Между тем при уменьшении числа полюсов увеличивается площадь полюсного деления, следовательно уменьшается число витков в фазе и, соответственно, может быть увеличено сечение проводника, а вместе с ним и кажущаяся мощность. Но из табл. 7 и 8 и рис. 22 и 23 видно, что при одной и той же кажущейся мощности значения к.п.д. и $\cos \varphi$ тем выше, чем меньше число полюсов, а потому полезная мощность возрастает еще больше.

Помимо того, увеличение скорости вращения улучшает охлаждение двигателя (кроме закрытых двигателей без обдува наружной поверхности), вследствие чего может быть повышена (хотя и не на много) плотность тока. Это в свою очередь ведет к некоторому повышению мощности.

Совершенно иначе происходит перемотка с двух или более пар полюсов на одну пару. Индукция в зазоре при этом не может сохранить прежнего значения, потому что если в случае, например, двух пар полюсов индукция в теле статора имела нормальное значение, то при одной паре полюсов оно удвоится, т. е. выйдет далеко за пределы допустимого.

Если же поставить нормальный предел значению индукции в теле статора, то индукция в зазоре должна быть уменьшена примерно вдвое. Следовательно, удвоение площади полюсного деления при переходе с двух пар полюсов на одну не даст выигрыша в числе витков в фазе, сечение проводника не может быть увеличено, и небольшое увеличение мощности может быть достигнуто только за счет улучшения вентиляции, позволяющей немного повысить плотность тока.

По этой причине двухполюсные двигатели выпускаются заводами с очень большой высотой тела статора, меж-

ду тем как двигатели с двумя, а тем более с тремя и четырьмя парами полюсов зачастую имеют при одинаковых диаметрах расточки одну и ту же высоту тела статора, относительно небольшую.

Обратная операция — перемотка с одной пары полюсов на две или более (если позволяет число зубцов статора) невыгодна по двум причинам: во-первых, двигатели с одной парой полюсов попадаются довольно редко и ими следует дорожить; во-вторых, двигатель, перемотанный с одной пары полюсов на две или более, теряет мощность, как это следует ожидать из приведенных ранее рассуждений, но сохраняет свой вес, чрезмерно большой из-за необычно высокого тела статора и соответственно преувеличенного корпуса.

При перемотках с изменением числа полюсов нет необходимости в проверке механической прочности ротора или его вала, так как по конструктивным соображениям они имеют всегда достаточный запас прочности. Однако это не распространяется на вентиляторы, которые могут оказаться недостаточно прочными при уменьшении числа полюсов и соответствующем увеличении скорости вращения. Следует рекомендовать в таких случаях испытание прочности вентиляторов при повышении скорости вращения на 20% сверх номинальной, например, вращая ротор собранной машины при помощи двигателя постоянного тока с регулируемой скоростью вращения (и принимая необходимые меры предосторожности против несчастных случаев при возможных разрывах вентиляторов).

Двигатели с фазовыми роторами (с контактными кольцами) при изменении числа полюсов требуют одновременной перемотки на новое число полюсов обеих обмоток — и статора и ротора; последнее представляет более сложную операцию и поэтому такие перемотки не следует предпринимать без крайней нужды.

Пример 6. Требуется определить мощность двигателя с катушечной обмоткой из предыдущего примера.

Плотность тока для машин защищенного исполнения с протяжной вентиляцией можно принять по табл. 6 или по рис. 21 в среднем $s_а = 5\ а/мм^2$. Тогда фазный ток будет

$$I_ф = s_а q_г a = 5 \cdot 2 \cdot 1{,}431 \cdot 1 = 14{,}31\ а.$$

Отсюда кажущаяся мощность

$$P = \frac{3U_ф\ I_ф}{1000} = \frac{3 \cdot 220 \cdot 14{,}31}{1000} = 9{,}45\ ква.$$

Для этой кажущейся мощности по табл. 7 и 8 или по кривым рис. 22 и 23 можно найти значения

$$\eta = 86\%$$
$$\cos\varphi = 0{,}85.$$

Таким образом, полезная мощность

$$P_2 = \frac{P\eta\cos\varphi}{100} = \frac{9{,}45 \cdot 86 \cdot 0{,}85}{100} = 6{,}9 \text{ квт}.$$

Остается проверить величину линейной нагрузки:

$$A = \frac{60w\ I_ф}{2p\ \tau a} = \frac{60 \cdot 132 \cdot 14{,}41}{4 \cdot 119{,}3 \cdot 1} = 237\ а/см.$$

По табл. 9 или по рис. 24 это значение ленейной нагрузки при полезной мощности около 7 *квт* оказывается примерно в середине ширины полосы для двигателей данного исполнения; это дает основание считать, что намотанный двигатель при достаточно тщательной пропитке обмотки не будет перегреваться выше допустимых пределов.

9. ВСЕГДА ЛИ МОЖНО ИЗМЕНИТЬ ЧИСЛО ПОЛЮСОВ?

Иногда наблюдается, что двигатель с короткозамкнутым ротором, перемотанный на новое число полюсов, непригоден для эксплуатации, несмотря на то, что расчет, казалось бы, произведен совершенно правильно.

Эта непригодность может выражаться в следующем:

а) двигатель прилипает, т. е. не берет с места при включении; однако если его сначала привести во вращение, хотя бы от руки, а затем включить, он пускается нормально;

б) двигатель берет с места, но дойдя до небольшой скорости вращения, застревает на ней;

в) двигатель в процессе пуска, а иногда и во время нормальной работы, производит резкий шум.

Причиной всех этих ненормальностей является неудачное соотношение чисел зубцов статора и ротора для данного числа полюсов.

Во избежание этого при перерасчете на новое число полюсов следует производить проверку упомянутого соотношения по следующим правилам:

1. Числа зубцов статора и ротора Z_1 и Z_2 не должны быть ни равны, ни кратны друг другу, иначе будет опасность прилипания:

$$Z_2 \neq Z_1;$$
$$Z_2 \neq \frac{1}{2} Z_1;$$
$$Z_2 \neq 2 Z_1.$$

2. Число зубцов ротора не должно делиться на утроенное число полюсов, иначе также возможно прилипание:

$$\frac{Z_2}{3 \cdot 2p} \neq \text{целое число.}$$

3. Число зубцов ротора, разделенное на число полюсов, не должно давать чисел 4, 7 и 10, иначе возможно застревание:

$$\frac{Z_2}{2p} \neq 4;$$
$$\frac{Z_2}{2p} \neq 7;$$
$$\frac{Z_2}{2p} \neq 10.$$

4. Числа зубцов статора и ротора не должны отличаться друг от друга на число пар полюсов или на число полюсов:

$$Z_2 \neq Z_1 \pm p;$$
$$Z_2 \neq Z_1 \pm 2p.$$

Число зубцов ротора не должно отличаться от половины числа зубцов статора на число пар полюсов:

$$Z_2 \neq \frac{1}{2} Z_1 \pm p.$$

Число зубцов ротора не должно отличаться от удвоенного числа зубцов статора на число полюсов:

$$Z_2 \neq 2 Z_1 \pm 2p.$$

При несоблюдении одного из этих трех условий также возможно застревание.

5. Число зубцов ротора, увеличенное или уменьшенное на единицу, не должно делиться на утроенное число полюсов:

$$\frac{Z_2 \pm 1}{3 \cdot 2p} \neq \text{целое число.}$$

Число зубцов ротора, увеличенное или уменьшенное на число полюсов, увеличенное или уменьшенное на единицу, не должно делиться на утроенное число полюсов, так как возможно гудение:

$$\frac{Z_2 \pm 2p \pm 1}{3.2p} \neq \text{целое число.}$$

Все эти правила не относятся к двигателям с фазовыми роторами, пускаемым с помощью реостатов; однако при переделке фазовых роторов на короткозамкнутые, хотя бы и без изменения числа полюсов, они должны быть учтены, так как опасность прилипания и застревания таких роторов очень велика.

Пример 7. Требуется проверить, будет ли двигатель из предыдущих примеров хорошо работать, если число зубцов его ротора $Z_2 = 26$.

Первое условие соблюдено, так как

$$26 \neq 36;$$
$$26 \neq \frac{36}{2};$$
$$26 \neq 2 \cdot 36.$$

Второе условие также соблюдено, потому что

$$\frac{26}{3 \cdot 4} = 2{,}17,$$

т. е. не является целым числом. Таким образом, ожидать опасности прилипания не следует.

Третье условие соблюдено, так как 26 не кратно ни 4, ни 7, ни 10.

Четвертое условие соблюдено, так как

$$26 \neq 36 \pm 2;$$
$$26 \neq 36 \pm 4;$$
$$26 \neq \frac{36}{2} \pm 2;$$
$$26 \neq 2 \cdot 36 \pm 4.$$

Следовательно, опасности застревания также нет.

Пятое условие соблюдено, так как

$$\frac{26 + 1}{3 \cdot 4} = 2{,}25,$$

$$\frac{26 - 1}{3 \cdot 4} = 2{,}08,$$

$$\frac{26+4+1}{3\cdot 4}=2{,}58, \qquad \frac{26-4+1}{3\cdot 4}=1{,}92,$$

$$\frac{26+4-1}{3\cdot 4}=2{,}42, \qquad \frac{26-4-1}{3\cdot 4}=1{,}75.$$

Ни одно из этих чисел не является целым и потому ненормальных шумов ожидать не следует.

Таким образом, данное соотношение чисел зубцов статора и ротора при данном числе полюсов следует считать удачным.

10. СВОДКА РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ

Чтобы дать полное и законченное представление о ходе расчета обмотки статора, здесь приводится еще раз вся последовательность расчетных операций с необходимыми пояснениями.

А. Задание

1. Исполнение двигателя: закрытый — без обдува или с обдувом наружной поверхности, открытый или защищенный — с нормальной или усиленной вентиляцией.
2. Требуемое напряжение при соединении фаз в треугольник $U_ф$ [*в*] или в звезду $U_л = 1{,}73\, U_ф$ [*в*].
3. Требуемая скорость вращения магнитного поля n_0 [*об/мин*].
4. Число пар полюсов

$$p=\frac{3000}{n_0}.$$

Б. Обмер сердечника статора

1. Внутренний диаметр сердечника статора D [*мм*]	По обмеру
2. Наружный диаметр сердечника статора $D_н$ [*мм*]	
3. Высота тела статора (если доступна) $h_с$ [*мм*]	
4. Полная длина сердечника статора $l_п$ [*мм*]	

5. Число пазов статора Z_1 (по счету).
6. Размеры пазов статора по рис. 3; в том числе полная глубина паза $h_п$ [*мм*] (по обмеру).
7. Ширина зубца $b_з$ [*мм*] (по обмеру).
8. Число $n_к$ и ширина $b_к$ [*мм*] поперечных, или число рядов $m_к$ и диаметр $d_к$ [*мм*] продольных вентиляционных каналов (по счету и обмеру).
9. Толщина листов стали сердечника Δ [*мм*] (по подсчету числа листов на определенной длине).
10. Род изоляции листов стали: бумага, лак, без изоляции.

В. Обработка результатов обмера

1. Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad [мм].$$

2. Расчетная длина статора:

а) при отсутствии поперечных вентиляционных каналов

$$l = l_п \quad [мм];$$

б) при наличии поперечных вентиляционных каналов

$$l = l_п - n_к b_к \ [мм].$$

3. Площадь полюсного деления

$$Q_в = \tau l \quad [мм^2].$$

4. Коэффициент заполнения стали $k_о$ (по табл. 1).

5. Чистая длина стали статора

$$l_о = k_о l \quad [мм].$$

6. Высота тела статора (если недоступна для измерения)

$$h_с = \frac{1}{2}(D_н - D - 2h_п) \quad [мм].$$

7. Площадь поперечного сечения стали тела статора:

а) при отсутствии продольных вентиляционных каналов

$$Q_с = h_с l_о \quad [мм^2];$$

б) при наличии одного ряда продольных вентиляционных каналов

$$Q_с = \left(h_с - \frac{2}{3} d_к\right) l_0 \ [мм^2] .$$

8. Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{Z_1}{6p} .$$

9. Площадь поперечного сечения стали зубцов

$$Q_з = 3\, q\, b_з\, l_0 \ [мм^2] .$$

10. Площадь поперечного сечения паза $Q_п$ [$мм^2$] (по соответствующей формуле рис. 3).

Г. Расчет числа витков в фазе

1. Тип обмотки (катушечная, цепная, двухслойная).
2. Шаг обмотки y (только для цепной и двухслойной обмоток). Обычно

$$y \approx 2{,}4\, q.$$

3. Обмоточный коэффициент k (по табл. 3 или 4).
4. Предварительное значение индукции в зазоре $B_в$ [*гс*] (в зависимости от размеров двигателя — в пределах от 5000 до 9000 *гс*).
5. Предварительное число витков в фазе

$$w = \frac{68\,600\,000\, U_ф}{k\, B_в\, Q_в} .$$

6. Варианты числа витков в фазе (пригодны только числа, которые делятся на $Z_1 : 6$ при однослойных обмотках или на $Z_1 : 3$ при двухслойных).
7. Значения индукции в зазоре для всех вариантов числа витков в фазе w

$$B_в = \frac{68\,600\,000\ U_ф}{k\, w\, Q_в} \ [гс].$$

8. Значение индукции в зубцах для всех вариантов числа витков в фазе

$$B_з = \frac{Q_в}{Q_з}\ B_в \ [гс].$$

9. Значение индукции в теле статора для всех вариантов числа витков в фазе

$$B_c = \frac{0{,}32\,Q_в}{Q_c} B_в \ [гс].$$

10. Окончательно выбранное число витков в фазе w (выбирается тот из вариантов, который дает наиболее благоприятное распределение индукций).

Д. Расчет диаметра проводника

1. Число параллельных ветвей a (для однослойных обмоток обычно $a = 1$; для двухслойных обмоток выбирается по соображениям укладки проводников в пазы).
2. Коэффициент заполнения паза $f_п$ (в зависимости от типа обмотки и формы пазов — от 0,33 до 0,50).
3. Число проводников в пазу

$$s_п = \frac{6\,w\,a}{Z_1}.$$

4. Поперечное сечение одного проводника с изоляцией

$$q_и = \frac{Q_п\,f_п}{s_п} \ [мм^2].$$

5. Число параллельных проводников (проводник подразделяется на параллельные, если сечение $q_и$ больше 3—4 $мм^2$).
6. Диаметр проводника с изоляцией

$$d_и = \sqrt{\frac{4\,q_и}{\pi}} \ [мм].$$

7. Марка проводника и двухсторонняя толщина изоляции (по табл. Б приложения; обычно марка ПЭЛБО, и лишь при ее отсутствии ПБД — для наиболее крупных сечений или ПЭЛШО — для самых мелких).
8. Диаметр проводника без изоляции $d_г$ [$мм$].
9. Окончательный диаметр голого проводника $d_г$ (исправленный по табл. В приложения).
10. Поперечное сечение голого проводника $q_г$ [$мм^2$] (по табл. В приложения).

Е. Расчет веса и сопротивления обмотки

1. Средняя ширина секции (только для цепных и двухслойных обмоток)

$$T = \frac{\pi\,(D + h_{п})\,y}{Z_1}\,[мм].$$

2. Коэффициент K (для двухслойных обмоток — по табл. 5; для цепных обмоток — по табл. 5 с надбавкой 10—15%).
3. Слагаемое L [*мм*] (для двухслойных обмоток — по табл. 5; для цепных обмоток — по табл. 5 с надбавкой 10—15%) или σ [*мм*] (для однослойных обмоток — от 20 до 50 *мм*).
4. Длина лобовой части:

   а) для цепных и двухслойных обмоток

$$l_{л} = KT + L\ [мм];$$

   б) для однослойных обмоток (в среднем)

$$l = 1{,}4\,\tau + \sigma\ \ [мм].$$

5. Полная длина витка

$$l_{в} = 2\,(l_{п} + l_{л})\ [мм].$$

6. Вес 1 *км* голого проводника g [*кг*] (по табл. В приложения).
7. Полный вес меди обмотки

$$G_{г} = \frac{3\,wal_{в}\,g}{1\,000\,000}\,[кг].$$

   (Если применены параллельные проводники, то их количество следует ввести в числитель; если сечения параллельных проводников неодинаковы, то расчет вести для каждого сечения отдельно и результаты суммировать).
8. Вес проводника с изоляцией

$$G_{и} = \left[0{,}876 + 0{,}124\left(\frac{d_{и}}{d_{г}}\right)^2\right] G_{г}\ [кг].$$

9. Сопоставление 1 *км* проводника r[*ом*] (по табл. В приложения).

10. Сопротивление одной фазы обмотки в холодном состоянии (при 15° С)

$$R=\frac{w\,l_{в}\,r}{1\,000\,000\,a}\ [ом].$$

(Если применены параллельные проводники, то их количество следует ввести в знаменатель; если сечения параллельных проводников неодинаковы, следует разделить единицу на сопротивление 1 *км* каждого из проводников, затем разделить единицу на сумму всех этих дробей и результат подставить в формулу вместо r).

Ж. Определение мощности после перемотки

1. Плотность тока $s_{а}$ [*а/мм*²] (выбирается по табл. 6 или рис. 21).
2. Фазный ток

$$I_{ф}=s_{а}q_{г}\,a\ [а].$$

(Если применены параллельные проводники, вместо $q_{г}$ следует взять сумму их сечений).

3. Кажущаяся мощность

$$P=\frac{3\,U_{ф}\,I_{ф}}{1000}\ [ква].$$

4. Коэффициент полезного действия η [%] (по табл. 7 или рис. 22).
5. Коэффициент мощности $\cos\varphi$ (по табл. 8 или рис. 23).
6. Полезная мощность

$$P_2=\frac{P\eta\cos\varphi}{100}\ [квт].$$

7. Линейная нагрузка

$$A=\frac{60\,w\,I_{ф}}{2p\,\tau\,a}\ [а/см].$$

(Проверяется по табл. 9 или рис. 24).

Этим и заканчивается расчет обмотки статора; к нему остается добавить проверку соотношения чисел пазов статора и ротора, производимую по правилам, приведенным в параграфе 9, если только статор перематывается на новое число полюсов или если прежнее число полюсов неизвестно.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРОВОДА МЕДНЫЕ ОБМОТОЧНЫЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

А. Марки проводника

ПЭЛШО — лакостойкая эмаль и один слой шелковой пряжи;

ПЭЛШД — лакостойкая эмаль и два слоя шелковой пряжи;

ПЭЛБО — лакостойкая эмаль и один слой хлопчатобумажной пряжи;

ПЭЛБД — лакостойкая эмаль и два слоя хлопчатобумажной пряжи;

ПЭЛБТ — лакостойкая эмаль и один слой подклеенной телефонной бумаги;

ПЭЛБВ — лакостойкая эмаль и один слой подклеенной длинноволокнистой бумаги;

ПШД — два слоя шелковой пряжи;

ПБО — один слой хлопчатобумажной пряжи;

ПБД — два слоя хлопчатобумажной пряжи;

ПБОО — один слой хлопчатобумажной пряжи и одна оплетка из хлопчатой бумаги;

ПЭТСО — эмаль и один слой стеклянной пряжи, подклеенной и пропитанной лаком;

ПСД — два слоя стеклянной пряжи, подклеенной и пропитанной лаком;

ПДА — один слой асбестового волокна, подклеенного и пропитанного лаком.

Б. Двухсторонняя толщина изоляции проводников различных марок

Марка проводника	Диаметр голого проводника $d_г$, *мм*										
	0,05—0,09	0,10—0,19	0,20—0,25	0,27—0,29	0,31—0,35	0,38—0,49	0,51—0,69	0,72—0,96	1,00—1,45	1,50—2,10	2,26—5,20
ПЭЛШО	0,070	0,075	0,090	0,100	0,105	0,110	0,115	0,125	0,135	0,155	—
ПЭЛШД	—	—	—	—	—	—	—	0,190	—	—	—
ПЭЛБО	—	—	0,125	0,155	0,160	0,165	0,170	0,180	0,210	0,210	—
ПЭЛБД	—	—	—	—	—	—	—	0,280	0,330	0,330	—
ПЭЛБТ	—	—	—	—	—	—	—	—	0,210	0,210	—
ПЭЛБВ	—	—	—	—	—	—	0,120	0,125	0,140	—	—
ПШД	Изготовляется по особым техническим условиям										
ПБО	—	—	0,100	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,140	0,140	—
ПБД	—	—	0,190	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,270	0,270	0,330
ПБОО	—	—	—	—	—	—	—	—	0,850	0,850	0,850
ПЭТСО	—	—	—	—	0,200	0,200	0,200	0,220	0,220	0,240	—
ПСД	—	—	—	—	0,230	0,230	0,250	0,250	0,270	0,270	0,330
ПДА	—	—	—	—	—	—	—	—	0,300	0,300	0,350

Примечание. Составлено на основании ГОСТ 6324-52 и ГОСТ 7019-54

В. Нормальные диаметры $d_г$, сечения $q_г$ вес g и сопротивление r 1 *км* меди обмоточной круглой

Диаметр $d_г$, *мм*	Сечение $q_г$, *мм²*	Вес 1 *км* g, *кг*	Сопрот. 1 *км* при 15°С r, *ом*	Диаметр $d_г$, *мм*	Сечение $q_г$, *мм²*	Вес 1 *км* g, *кг*	Сопрот. 1 *км* при 15°С r, *ом*	Диаметр $d_г$, *мм*	Сечение $q_г$, *мм²*	Вес 1 *км* g, *кг*	Сопрот. 1 *км* при 15°С r, *ом*
0,05	0,00196	0,01746	9100	0,47	0,1735	1,542	99,2	(1,30)	1,327	11,80	12,96
0,06	0,00283	0,0252	6310	(0,49)	0,1886	1,676	91,3	1,35	1,431	12,73	12,01
0,07	0,00385	0,0342	4630	0,51	0,204	1,816	84,4	(1,40)	1,539	13,69	11,18
0,08	0,00503	0,0447	3550	(0,53)	0,221	1,961	77,8	1,45	1,651	14,68	10,41
0,09	0,00636	0,0566	2810	0,55	0,238	2,11	72,3	(1,50)	1,767	15,71	9,74
0,10	0,00785	0,0698	2270	(0,57)	0,255	2,27	67,5	1,56	1,911	16,99	9,00
0,11	0,00950	0,0845	1813	0,59	0,273	2,43	63,0	(1,62)	2,06	18,32	8,36
0,12	0,01131	0,1005	1524	(0,62)	0,302	2,68	57,0	1,68	2,22	19,71	7,75
0,13	0,01327	0,1180	1296	0,64	0,322	2,86	53,4	(1,74)	2,38	21,1	7,23
0,14	0,01539	0,1358	1118	(0,67)	0,353	3,13	48,7	1,81	2,57	22,9	6,70
0,15	0,01767	0,1571	974	0,69	0,374	3,32	46,0	(1,88)	2,78	24,7	6,19
0,16	0,0201	0,1788	856	(0,72)	0,407	3,62	42,3	1,95	2,99	26;5	5,76
0,17	0,0227	0,202	758	0,74	0,430	3,82	40,0	(2,02)	3,20	28,5	5,38
0,18	0,0255	0,226	674	(0,77)	0,466	4,14	36,9	2,10	3,46	30,8	4,97
0,19	0,0284	0,252	606	0,80	0,503	4,47	34,2	2,26	4,01	35,7	4,29
0,20	0,0314	0,279	548	(0,83)	0,541	4,81	31,8	2,44	4,68	41,6	3,68
0,21	0,0346	0,308	497	0,86	0,581	5,16	29,6	2,63	5,43	48,3	3,17
0,23	0,0415	0,369	415	(0,90)	0,636	5,66	27,0	2,83	6,29	55,9	2,73
0,25	0,0491	0,436	351	0,93	0,679	6,04	25,3	3,05	7,31	65,0	2,35
0,27	0,0573	0,509	300	(0,96)	0,724	6,43	23,8	3,28	8,45	75,1	2,04
0,29	0,0661	0,587	260	1,00	0,785	6,98	21,9	3,53	9,79	87,0	1,758
0,31	0,0755	0,671	228	(1,04)	0,849	7,55	20,3	3,80	11,34	100,8	1,518
0,33	0,0855	0,760	201	1,08	0,916	8,14	18,79	4,10	13,20	117,4	1,303
0,35	0,0962	0,855	178,8	(1,12)	0,985	8,75	17,47	4,50	15,90	141,4	1,082
0,38	0,1134	1,008	151,8	1,16	1,057	9,40	16,28	4,80	18,10	160,9	0,951
0,41	0,1320	1,173	130,3	(1,20)	1,131	10,05	15,22	5,20	21,2	188,8	0,812
0,44	0,1521	1,352	113,2	1,25	1,227	10,91	14,02				

Примечание. Диаметры проводников в скобках являются мало употребительными.

СОДЕРЖАНИЕ

Жерве Георгий Константинович

КАК РАССЧИТАТЬ ОБМОТКУ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Редактор *П. Я. Бергман*

Технический редактор *О. С. Житникова*

Сдано в производство 10/III 1960 г.
Подписано к печати 26/VII 1960 г. М-22441.
Печ. л. 3,28. Уч.-изд. л. 3. Формат 84 X 108 1/32
Бум. л. 1. Тираж 26 000. Заказ 311.
Цена 1 р. 10 к. С 1/I-61 г. — 11 к.

Типография, КОИЗ, Ленинград, Фонтанка, 62

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
14	18 снизу	$z_п$	$l_п$
35	6 сверху	$\sqrt{\frac{4 \cdot 3{,}35}{3{,}14 \cdot 2}}$	$\sqrt{\frac{4 \cdot 3{,}75}{3{,}14 \cdot 2}}$
57	2 снизу	Сопоставление	Сопротивление

Г. К. Жерве. Зак. 311

Цена 1 р. 10 к.

С 1/I 1961 г. — 11 к.